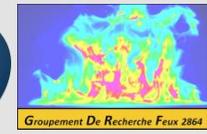


Métrologie thermique pour l'incendie

Par Z. ACEM, D. MARQUIS et G. PARENT



PRÉSENTATION DES INTERVENANTS

- D. MARQUIS – Ingénieur de recherche – Expert technique en Thermique et Sécurité incendie au LNE

Damien.Marquis@lne.fr

- G. PARENT – Professeur des Universités à l'Université de Lorraine rattaché à l'O.S. FEUX du LEMTA

gilles.parent@univ-lorraine.fr

- Z. ACEM – Maître de Conférences à l'Université de Lorraine rattaché à l'O.S. FEUX du LEMTA

zoubir.acem@univ-lorraine.fr

SOMMAIRE

- **PARTIE 1 : Les thermocouples**
- **PARTIE 2 : Les capteurs de flux**
- **PARTIE 3 : Spectrométrie et imagerie infrarouge**

Thermométrie par thermocouple



PARTIE 1

- 1) Refonte du système international d'unité
- 2) Echelle international de température
- 3) Température
- 4) Thermométrie : Couple thermoélectrique



Refonte du Système International d'unités

Kelvin : la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau

26^e Conférence générale des poids et mesures 2018

Kelvin : constante de Boltzmann (k_B) reliée au quantum d'énergie d'agitation thermique $k_B T$



- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique



Thermomètre acoustique développé au laboratoire commun de métrologie LNE-LCM/CNAM

$k_B = (1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23})$
avec une incertitude relative de $0,57 \times 10^{-6}$

France :

- ✓ Travaux initiés par le Laboratoire commun de métrologie LNE-LCM/CNAM
- ✓ Basé sur thermomètre acoustique

Echelle internationale de température

Thermodynamique : Variable d'état intensive (non proportionnel à la quantité de matière) naturellement non mesurable stricto sensus

Physique statistique : Mouvement atomique

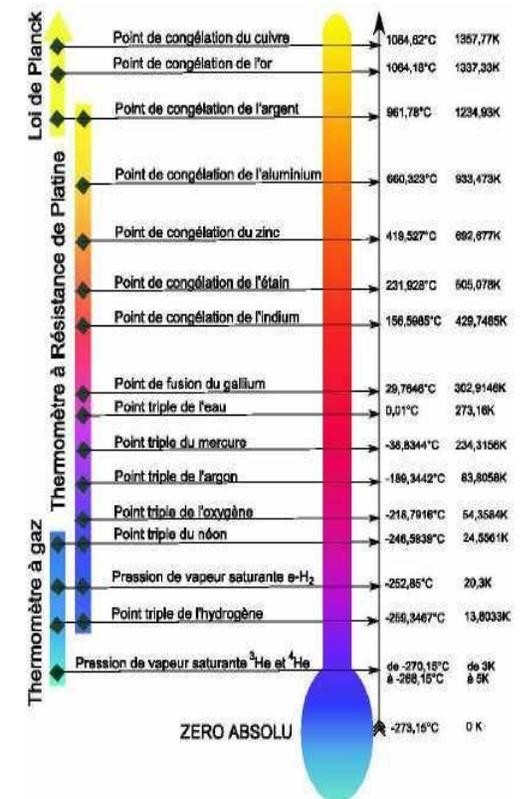
Echelle de température est définie par 3 éléments :

- ✓ Point fixe reproductible basé sur des états d'équilibre
- ✓ Instrument de mesure primaire (ou absolue)
- ✓ Polynôme d'interpolation

∃ 2 échelles de température :

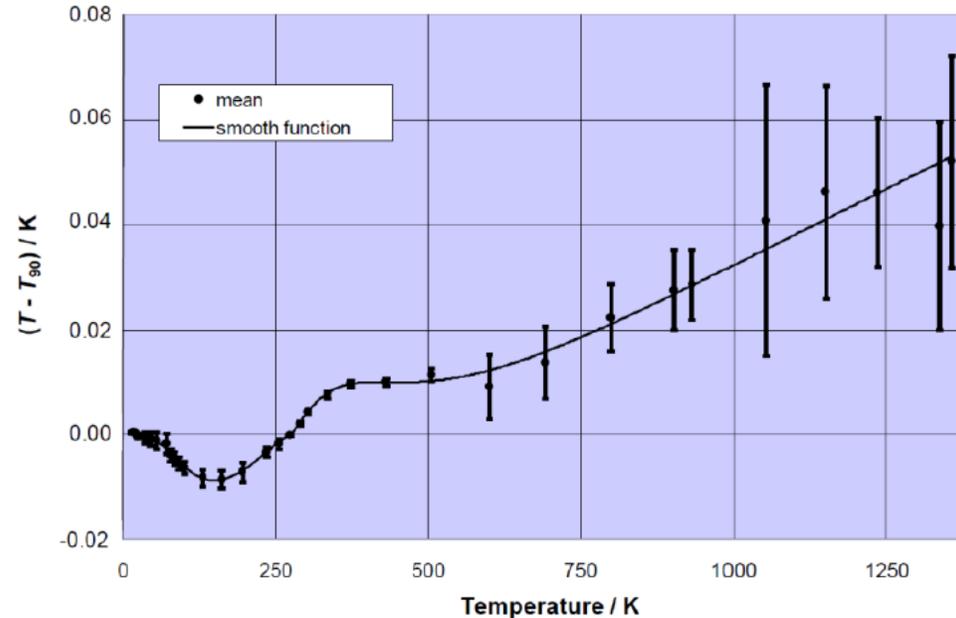
- ✓ L'EPBT-2000 pour $T \in [1,9 \text{ mK et } 1 \text{ K}]$.
- ✓ L'EIT-90 pour $T > 0,65 \text{ K}$ jusqu'à la température la plus élevée (loi de Planck pour un rayonnement monochromatique).

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique



- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique

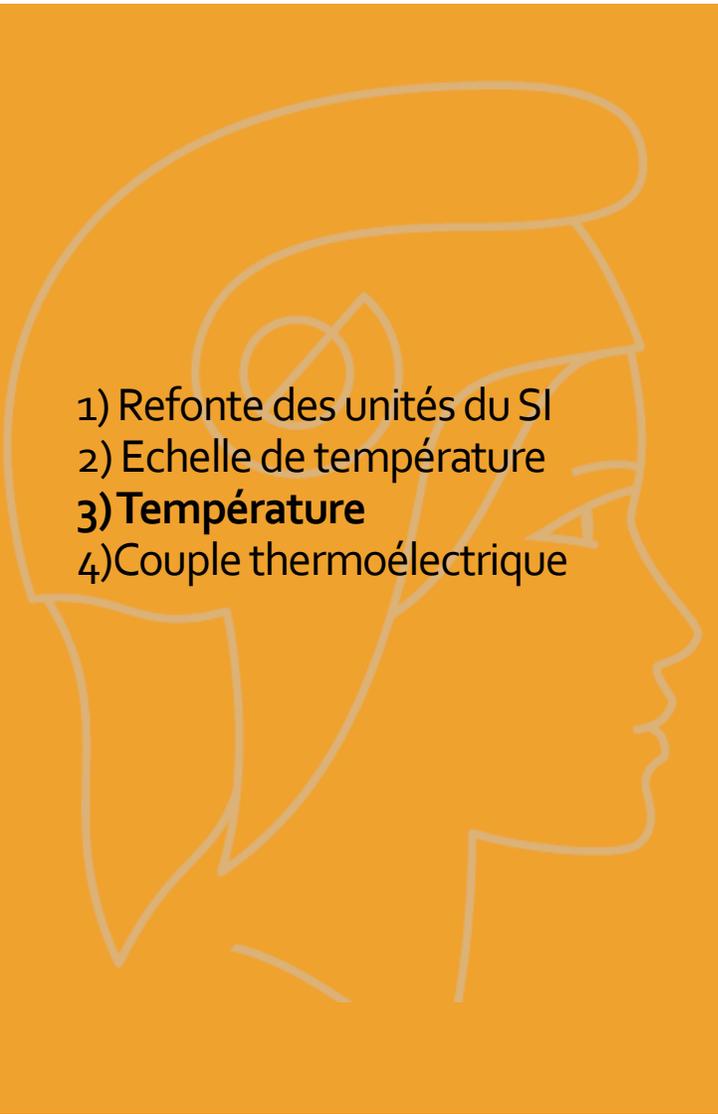
Echelle internationale de température



Ecart entre la température thermodynamique des points fixes de l'EIT 90 et la température donnée dans l'EIT 90

Travaux pour améliorer l'exactitude des mesures de sorte à définir une échelle plus juste et plus proche de la température thermodynamique

➔ Développement de points fixes jusqu'à 3200K



- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température**
- 4) Couple thermoélectrique

Température : comment la mesurer?

La mesure de température implique l'existence d'un équilibre thermique entre différents systèmes:

Principe zéro en thermodynamique : « Deux systèmes en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux »

Température est repérable par la variation de variable repère

Type de capteur	Variable repère	Domaine fréquent d'utilisation
Thermomètre à dilatation	Volume	-200 à 650°C
Couple thermoélectrique	Force électromotrice	0 à 2500°C
Thermomètre à résistance de platine	Résistance	-260 à 960°C
Thermistance	Résistance	0 à 100°C
Pyromètre	Rayonnement	0-2500°C

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Rappel

Effet Seebeck :

- *f.é.m* dans un circuit ouvert constitué de deux conducteurs de nature différentes, soumis a un ∇T .
- Combinaison de 2 phénomènes, l'effet Thomson et l'effet Peltier

Hypothèses

- Fem : $f(T)$
- Mesure ponctuelle
- Conducteurs stable dans le temps (∇T)

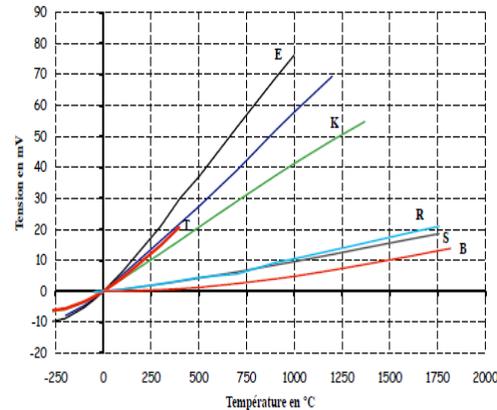
Pouvoirs thermoélectriques (en $\mu V/K$)				
Métaux		T=100K	T=300K	T=500K
Ag	Argent	0.73	1.51	2.82
Al	Aluminium	-2.2	-1.66	1.96
Au	Or	0.82	1.94	2.86
Bi	Bismuth		-65	
Cd	Cadmium	-0.05	2.55	
Co	Cobalt	-8.43	-30.8	-44.8
Cr	Chrome	5	21.8	16.6
Cu	Cuivre	1.19	1.83	2.83
Fe	Fer	11.6	15	3
In	Indium	0.56	1.68	
Ir	Iridium	1.42	0.86	-0.1
Mn	Manganèse	-2.5	-9.8	-8.4
Mo	Molybdène	0.1	5.6	11.4
Ni	Nickel	-8.5	-19.5	-25.8
Pb	Plomb	-0.58	-1.05	-1.5
Sb	Antimoine		36	
Ti	Titane	-2	9.1	5.3
W	Tungstène	-4.4	0.9	9
Zn	Zinc	0.7	2.4	
Zr	Zirconium	4.4	8.9	4.6

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

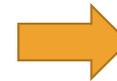
Stabilité en température



Stabilité en température dépend de la nature des conducteur

Altération

- ✓ cuivre à $T > 550^{\circ}\text{C}$
- ✓ Cuivre Nickel à $T > 700^{\circ}\text{C}$
- ✓ Nickel/chrome à $T : 800-900^{\circ}\text{C}$



Recourt au chemisage (gaine isolante)

Type de couple	Diamètre des éléments du couple				
	3,3 mm	1,6mm	0,8mm	0,5mm	0,3mm
B				1700°C	
E	870°C	650°C	540°C	430°C	430°C
J	760°C	590°C	480°C	370°C	370°C
K	1260°C	1090°C	980°C	870°C	870°C
R et S				1480°C	
T		370°C	260°C	200°C	200°C

Température maximale d'utilisation fonction du diamètre

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Stabilité sous différentes atmosphères

Type	Sensibilité moyenne	Températures d'utilisation	Mise en garde
K	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-180 à 1 350 $^\circ\text{C}$	☉ atmosphère oxydante
N	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-270 à 1 300 $^\circ\text{C}$	☉ plus stable que le K
S	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 à 1 600 $^\circ\text{C}$	⊗ atmosphères oxydante
B	9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	50 à 1 750 $^\circ\text{C}$	⊗ atmosphères oxydante
R	12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 à 1 700 $^\circ\text{C}$	⊗ atmosphères oxydante
Pt/Pd	6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	100 à 1 500 $^\circ\text{C}$	☉ atmosphères oxydante
G (W)	21 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	400 à 2 300 $^\circ\text{C}$	⊗ Ambiance oxydante
C (W5)	18 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	400 à 2 300 $^\circ\text{C}$	⊗ atmosphère oxydante
D (W3)	20 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	400 à 2 300 $^\circ\text{C}$	⊗ atmosphère oxydante

Atmosphère oxydante

- ✓ Entre 200 et 600 $^\circ\text{C}$: Transformation allotropique des couples K (dérive temporelle)
- ✓ Alliage de nickel : Phénomène de passivation surfacique (à partir de 850 $^\circ\text{C}$) en particulier sur les éléments négatifs des couples → Limite la corrosion
- ✓ Présence de chromel limite également la corrosion

Atmosphère réductrice ou appauvrie en oxygène

- ✓ Température d'emploi limitée (oxydation sont réduites ou ne se produisent pas)
- ✓ Oxydation préférentielle du chrome de l'élément chromel/alumel

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

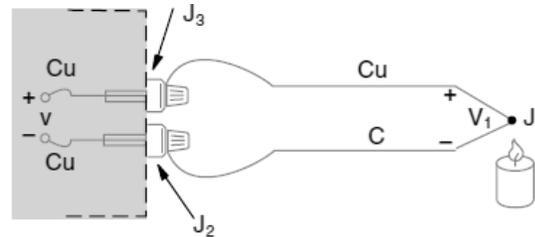
- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

Cas 1 : Couple T (cuivre/constantan) connecté directement à un voltmètre

- ✓ J₁ : Jonction ou Soudure chaude
- ✓ Bornier en cuivre



Un couple ne mesure pas à proprement parlé une tension mais une différence de tension

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

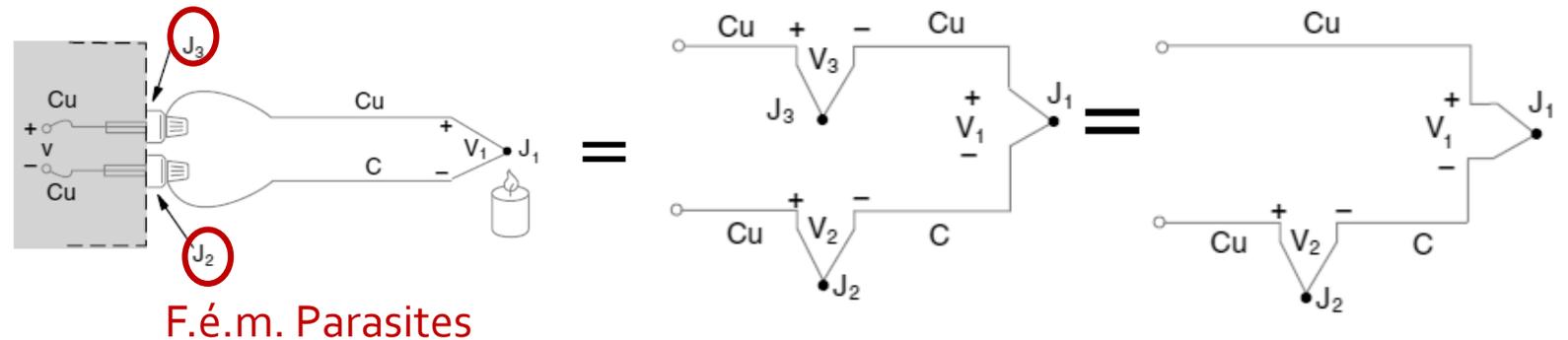
- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

Cas 1 : Couple T (cuivre/constantan) connecté directement à un voltmètre

- ✓ J₁ : Jonction ou Soudure chaude
- ✓ Bornier en cuivre



Tension mesurée : $V_m = V_1 - V_2$ $V_3 = 0$ dans le cas présent

Pour mesurer la température, il ne suffit pas de connecter directement un thermocouple à un appareil de mesure (ex voltmètre)

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

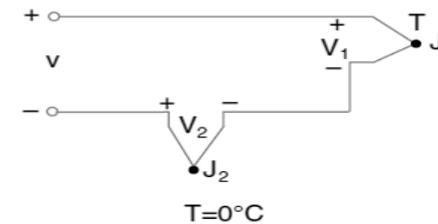
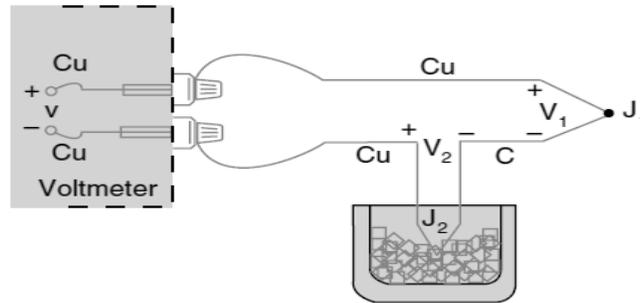
Cas 1 : Couple T (cuivre/constantan) connecté directement à un voltmètre

- ✓ J₁ : Jonction ou Soudure chaude
- ✓ Bornier en cuivre
- ✓ J₂ Jonction froide

Solution : Jonction de référence externe



Maitriser la température à la jonction J₂



Tension mesurée : $V_m = V_1 - V_2$

$V_2 = 0$ à une $T = 0^\circ\text{C}$

$V_3 = 0$ dans le cas présent

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

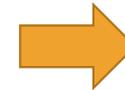
Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

Cas 1 : Couple J (fer/constantan) connecté directement à un voltmètre (Cu/Cu)

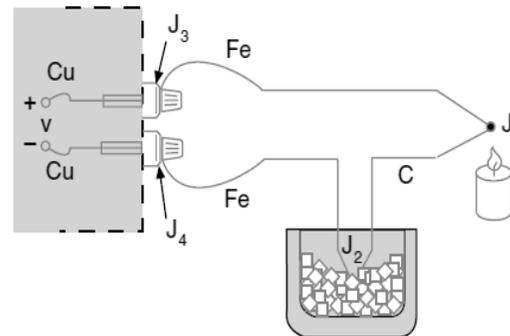
- ✓ J₁ : Jonction ou Soudure chaude
- ✓ J₂ : Jonction froide

2 F.é.m. parasites aux borniers



Utiliser des jonctions de référence externes de sorte à partir en Cu/Cu)

Alternative : Annulation des f.é.m. parasites



Si les T aux bornes sont identiques

- ✓ Utilisation de connecteurs de mêmes natures aux bornes de sorte à annuler les F.é.m.
- ✓ Tension mesurée : $V_m = V_1 - V_2 + V_3 - V_4$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_2 = 0 \text{ à une } T = 0^\circ\text{C} \\ V_3 = V_4 \end{array} \right.$$

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

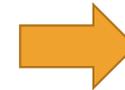
Couple thermoélectrique

Mesure de tension

Cas 1 : Couple J (fer/constantan) connecté directement à un voltmètre (Cu/Cu)

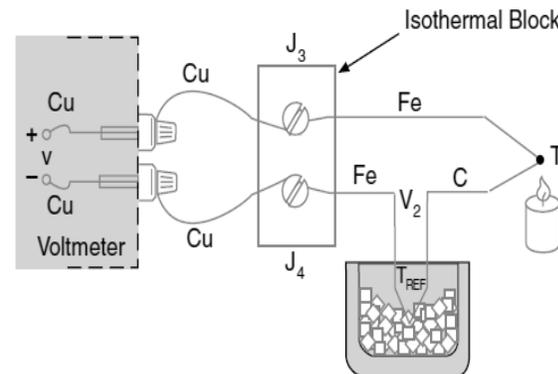
- ✓ J₁ : Jonction ou Soudure chaude
- ✓ J₂ : Jonction froide

2 F.é.m parasites aux borniers



Utiliser des jonctions de référence externes de sorte à partir en Cu/Cu)

Alternative : Annulation des f.é.m. parasites



Si les T aux bornes sont différentes

- ✓ Utilisation d'un bloc isotherme
- ✓ Tension mesurée $V_m = V_1 - V_2 + V_3 - V_4$

$$\begin{cases} V_2 = 0 \text{ à une } T = 0^\circ\text{C} \\ V_3 = V_4 \end{cases}$$

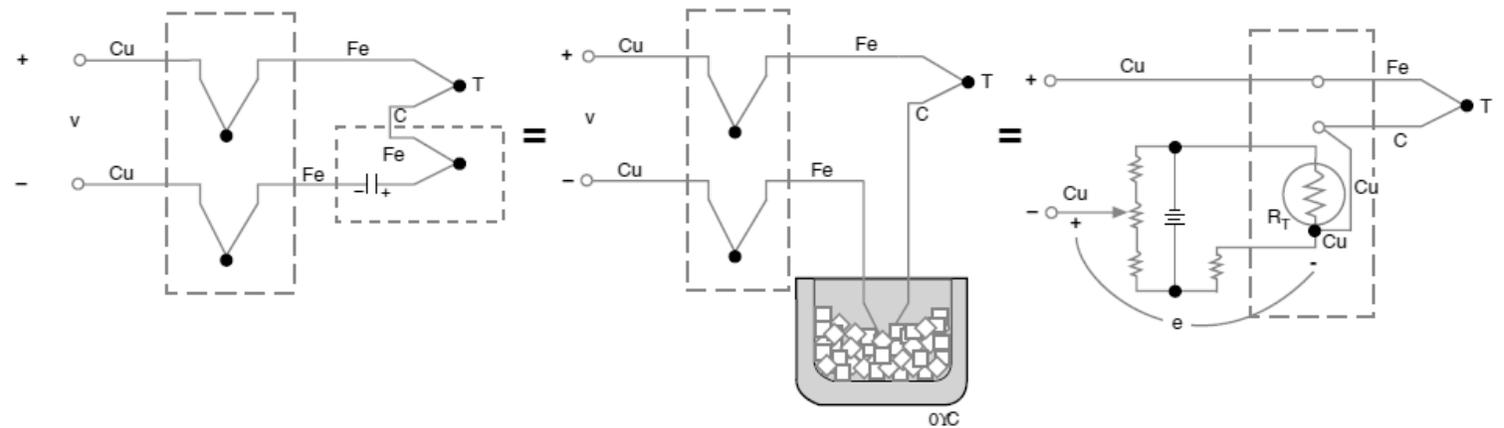
- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

Compensation électronique



Méthode la mieux adaptée pour réduire les incertitudes reste l'utilisation de jonction de référence externe

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- **Mesure de tension et conversion**
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

Mesure de tension et conversion

✓ Par équation polynomiale $T_{90} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + \dots + c_nx^n$

température (°C)	-200 à 0	0 à 500	500 à 1372
Tension (mV)	-5.891 à 0.000	0.000 à 20.644	20.644 à 54.886
c_0	0	0.000000E+00	-1.318058E+02
c_1	2.5173462E+01	2.508355E+01	4.830222E+01
...	...		
c_9	0	-1.052755E-08	0
Erreur (°C)	-0.02 à 0.04	-0.05 à 0.04	-0.05 à 0.0

Alternative : Méthode de homer $T_{90} = c_0 + x(c_1 + x(c_2 + x(c_3 + c_4x)))$

✓ Par extraction des tables ITS-90 (Dichotomie & interpolation)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- **Temps de réponse**
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Couple thermoélectrique

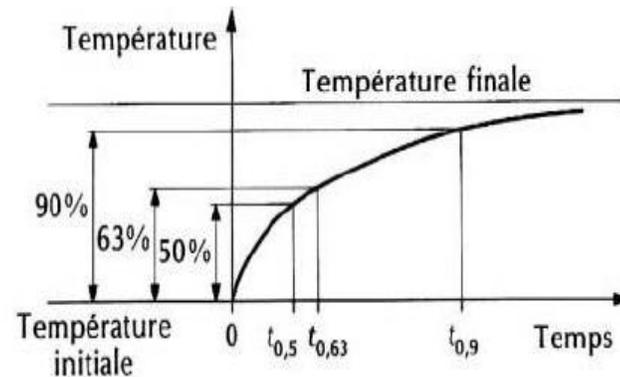
Temps de réponse



Temps de réponse d'une chaîne de mesure est lié principalement à celui du capteur utilisé

Pas une caractéristique intrinsèque, f (ensemble capteur/environnement)

- ✓ Diffusivité thermique du capteur,
- ✓ Rapport volume surface
- ✓ Nature du milieu
- ✓ Vitesse du corps (milieu ou capteur)
- ✓ Présence ou non de gaine de protection



Couple Ø (mm)	chemisé	Temps de réponses [s]			
		Eau pour 0,2 m/s		Air pour 0,2 m/s	
		t 0,5 (s)	t 0,9 (s)	t 0,5 (s)	t 0,9 (s)
0,5		0,03	0,10	1,80	6,00
1,0		0,06	0,18	3,00	10,00
1,5		0,13	0,40	8,00	25,00
3,0		0,22	0,75	23,00	80,00
4,5		0,45	1,60	33,00	110,00
6,0		0,55	2,60	55,00	185,00
8,0		0,75	4,60	97,00	310,00

Tps de réponse réduit : couple avec soudure exposée et de faible diamètre.
Attention : température max amoindrie et risque de dérive dans le temps

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- **Mesure de température surfacique et volumique**
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Mesure température surfacique & volumique

∃ 2 méthodes [1]:

✓ Méthode directe



✓ Méthode indirecte [2]



Guide d'étalonnage des capteurs de température de surface :

<https://www.lne.fr/fr/guides-techniques/guide-etalonnage-capteur-temperature-surface>

Références sur le sujet

[1] Cassagne B, Kirsch G and Bardon J P *Int. J. Heat Mass Transfer* **23**, 1207

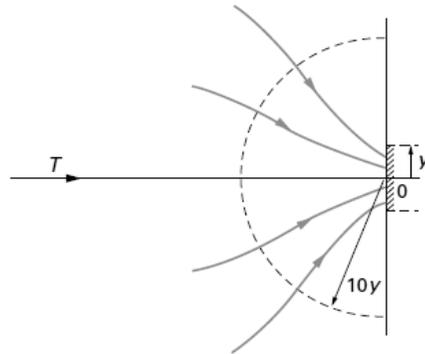
[2] M Raynaud, *Technique de l'ingénieur*, **BE 8 269** - 2008

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique

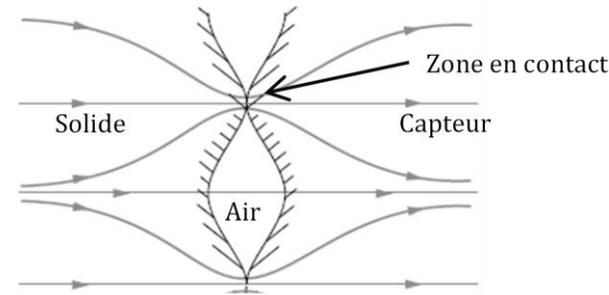
- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- **Mesure de température surfacique et volumique**
- Mesure de température de gaz
- Source d'erreurs

Mesure température surfacique & volumique

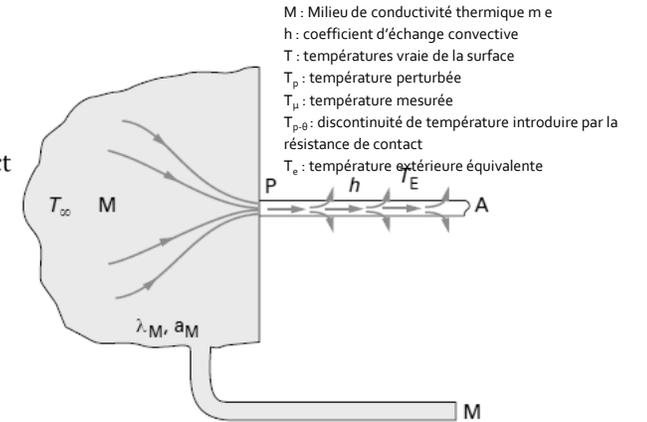
Effets parasites sur la mesure



Macroconstriction



Résistance de contact



Effet ailette du couple

Erreur de mesure ($T_m - T$)

$$T_m - T = - \frac{R_m + R_c + R_x}{R_m + R_c + R_e} (T - T_e)$$

R_m la résistance thermique de macroconstriction (m^2K/W)

R_c la résistance thermique de contact (m^2K/W),

R_x la résistance thermique de l'interface surface/capteur et l'élément sensible du capteur (m^2K/W)

R_e la résistance thermique globale entre la surface de contact et le milieu extérieur (m^2K/W)

T_e température ambiante

T Température avant la présence du capteur.

T_m Température au niveau sensible du capteur

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) **Couple thermoélectrique**

- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- **Mesure de température de gaz**
- Source d'erreurs

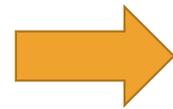
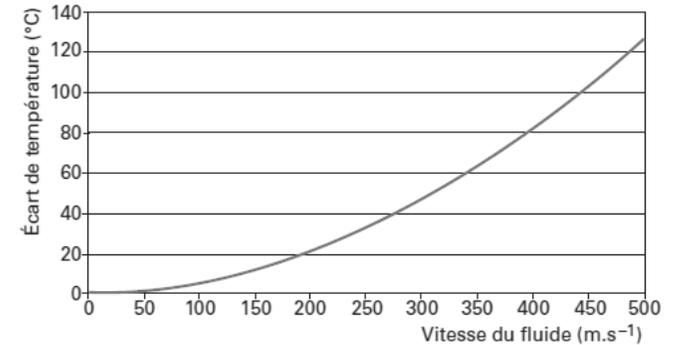
Mesure température de gaz

Fluide en mouvement :

Température mesure = Température d'arrêt

$$T_m = T + \frac{V}{2C_p}$$

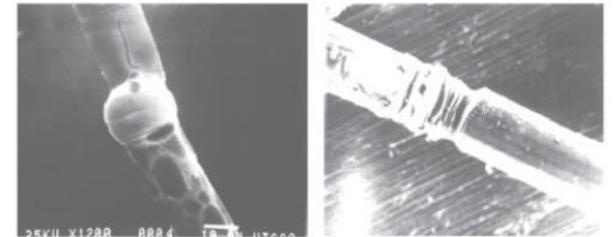
Température statique



Capteur doit posséder une faible capacité calorifique et une conductance élevée.

Micro couple thermoélectrique (jonction exposée)
type K ou S

- ✓ Temps de réponse très court
- ✓ Dérive dans le temps (transformation allotropique)



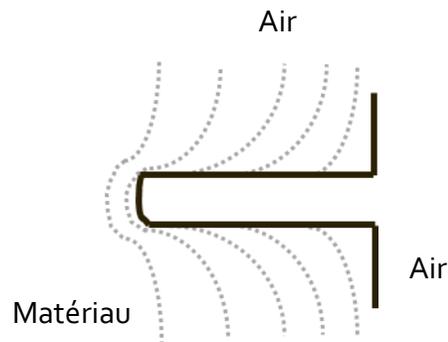
- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température

4) Couple thermoélectrique

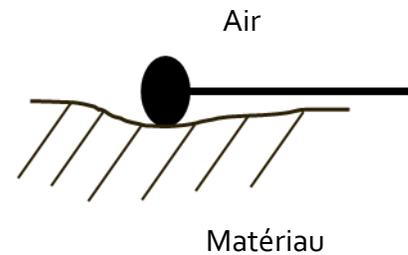
- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- **Source d'erreurs**

Erreurs imputables aux couples

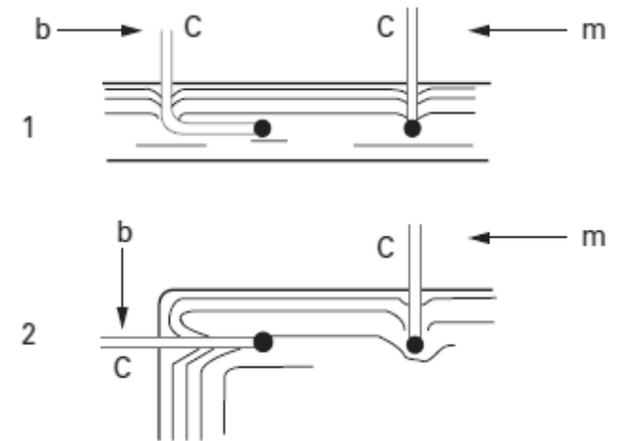
- ✓ Caractère intrusif de la mesure
 - Capacité thermique du couple
 - Altération des isothermes
 - Equilibre thermique
 - Fuite thermique vers l'extérieur
 - Position exacte du couple



Altération des isothermes
(présence d'un trou et/ou du couple)



Contact (surface) et
Equilibre thermique



Orientation et mise en
place du couple

B : Bon
M : mauvais

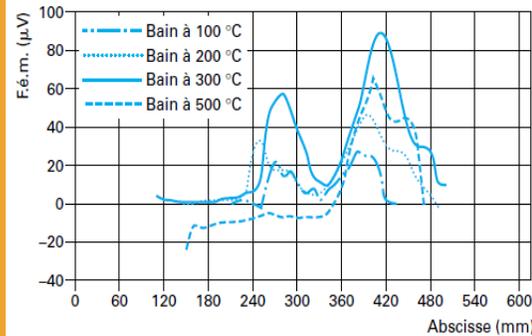
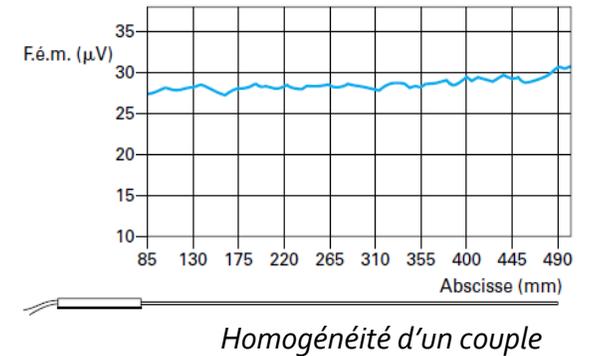
Stabilité et hétérogénéité

Principales dérives et hétérogénéités

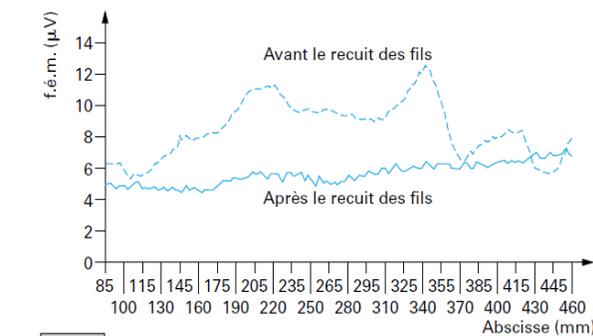
- ✓ Oxydation des métaux
- ✓ Migration des impuretés dans les fils
- ✓ Diffusion (d'impureté de la gaine ou/et de l'isolant)
- ✓ Modification de la structure cristalline
- ✓ Contrainte mécanique

- 1) Refonte des unités du SI
- 2) Echelle de température
- 3) Température
- 4) Couple thermoélectrique

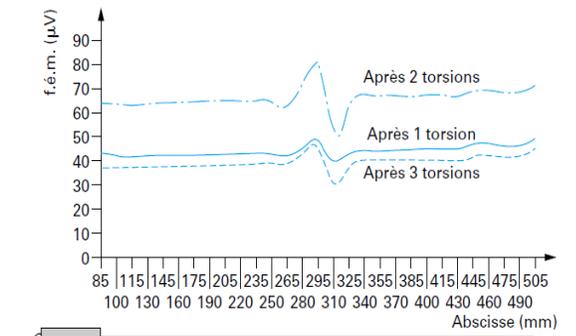
- Généralité
- Mesure de tension et conversion
- Temps de réponse
- Mesure de température surfacique et volumique
- Mesure de température de gaz
- **Source d'erreurs**



Hétérogénéité



Hétérogénéité après recuit



Hétérogénéité après torsion



Formations LNE

Métrologie des températures

- ✓ Métrologie pratique des températures
- ✓ Etalonnage des couples thermoélectriques et recherche des défauts d'homogénéité dans ce type de capteurs
- ✓ Etalonnage aux points fixes de l'Echelle Internationale des Températures (EIT-90)
- ✓ Spectroradiométrie Photométrie : techniques de mesure
- ✓ La norme AMS 2750 – Pyrométrie
- ✓ ...

Métrologie générale

- ✓ Evaluation et maîtrise des incertitudes de mesure
 - ✓ Statistiques de base appliquées à la mesure
 - ✓ Evaluation pratique des incertitudes de mesure et d'essais
- Disponible sur le site : <https://www.lne.fr/fr/services/formation>

PARTIE 2

Les capteurs de flux

GÉNÉRALITES

LES CAPTEURS DE FLUX A GRADIENT

LE CAPTEUR DE TYPE GARDON

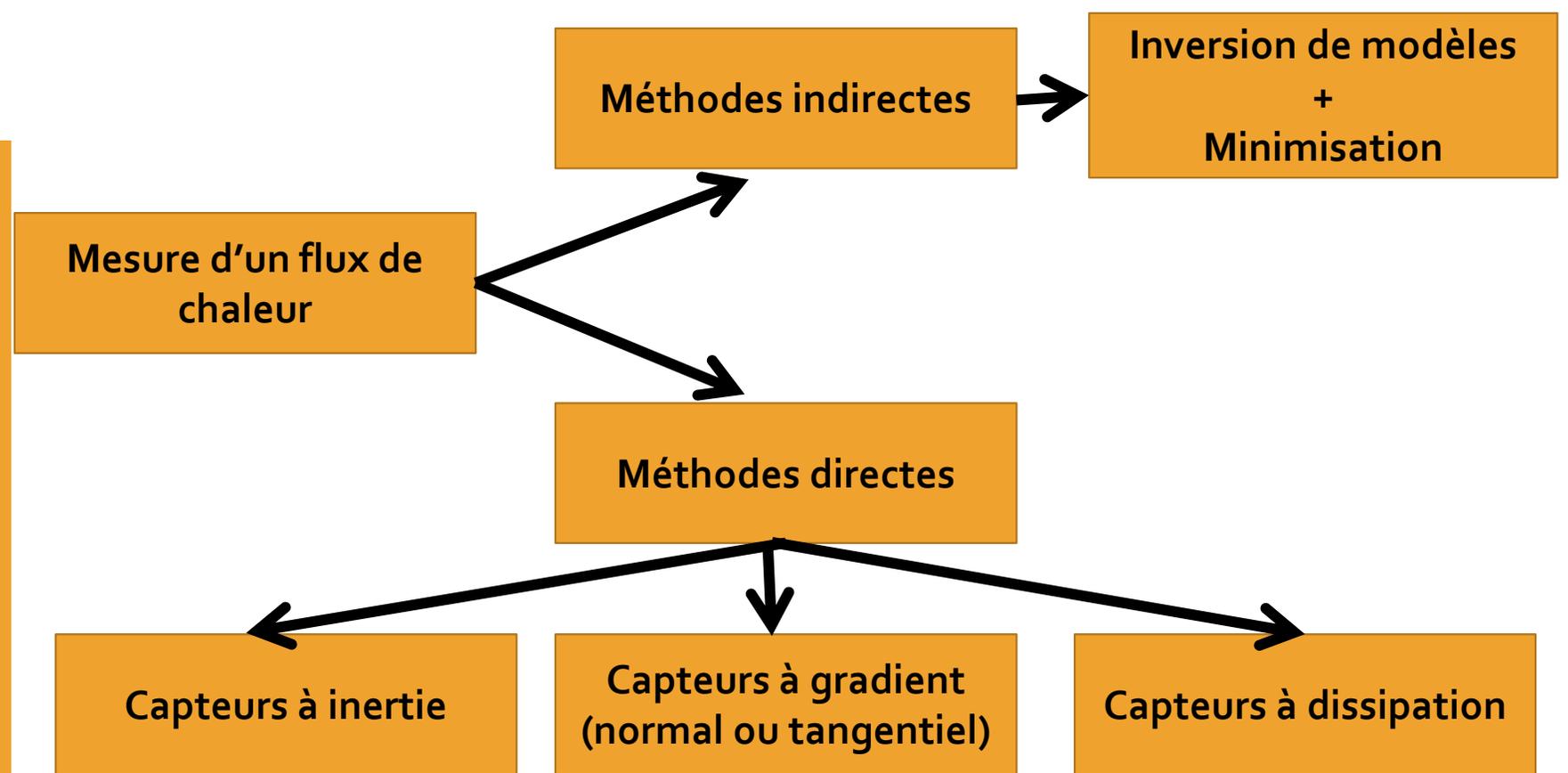
LE CAPTEUR DE TYPE SCHMIDT BOELTER

LE CAPTEUR DE TYPE THERY

CRITERES DE CHOIX ET DE PERFORMANCES

ETALONNAGE

GÉNÉRALITES



Principe simpliste :

$$\varphi_{inc} = \frac{1}{S_c} * E$$

φ_{inc} : Flux incident ($W.m^{-2}$)
 S_c : Sensibilité ($\mu V/(W.m^{-2})$)
 E : f.é.m (μV)

Capteurs de type Gardon, Schmidt-Boelter et Théry

R. GARDON (1960)

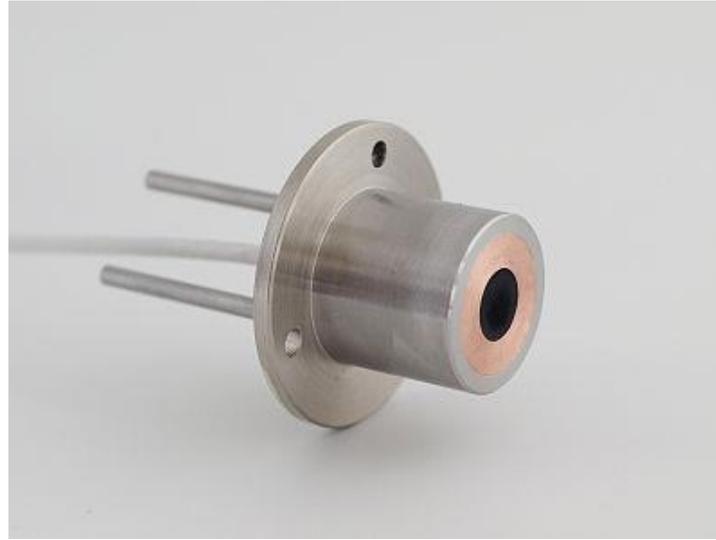
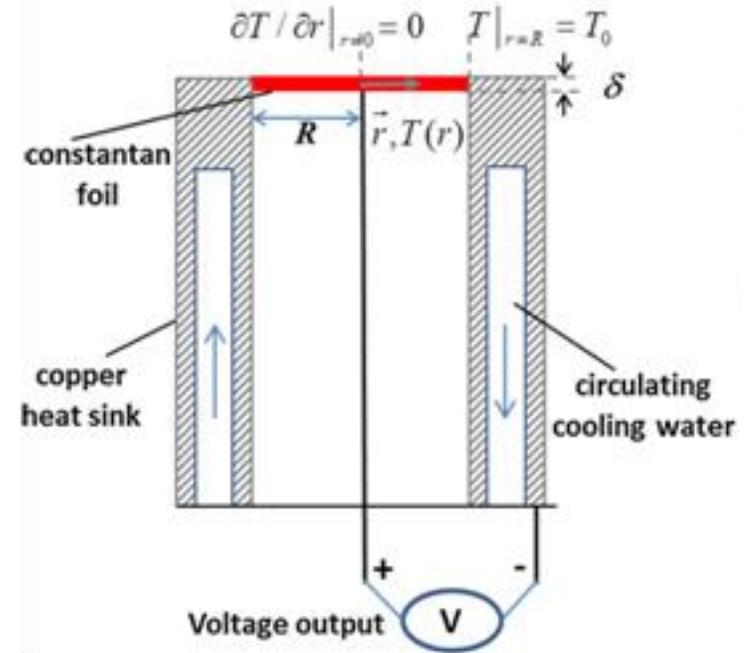


Schéma de principe :



LE CAPTEUR DE TYPE GARDON

Élément sensible : Feuille de **constantan** (qq μm)

Puits de chaleur : bloc massif creux en **cuivre**

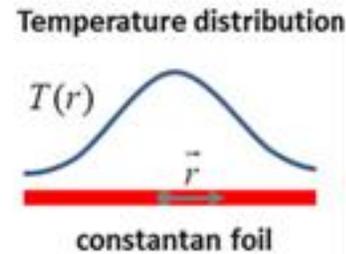
Fermeture : fil de **cuivre soudé au centre de la feuille**

Thermocouples
Cuivre / Constantan / Cuivre
en différentiels

Mesure de la différence $T_{(r=0)} - T_{(r=R)}$

LE CAPTEUR DE TYPE GARDON

Gradient de température radial



$$\varepsilon * \pi * r^2 * \varphi_r = -\lambda * 2 * \pi * r * \delta * \frac{dT}{dr}$$

$$T_{(r=0)} - T_{(r=R)} = \frac{R^2}{4 * \lambda * \delta} \varepsilon * \varphi_r$$

Avantages :

- Simple et robuste
- Gamme de flux élevée (100 kW.m⁻²)
- Signal de sortie directement proportionnel au flux incident
- Stable en température

Inconvénients :

- Présence d'un fort flux convectif : **Destruction du profil parabolique**
- Problème de condensation sur la surface
- Encrassement par dépôt de suies

LE CAPTEUR DE TYPE SCHMIDT BOELTER

E. Schmidt (1924) et L. M. K. Boelter (~1950)

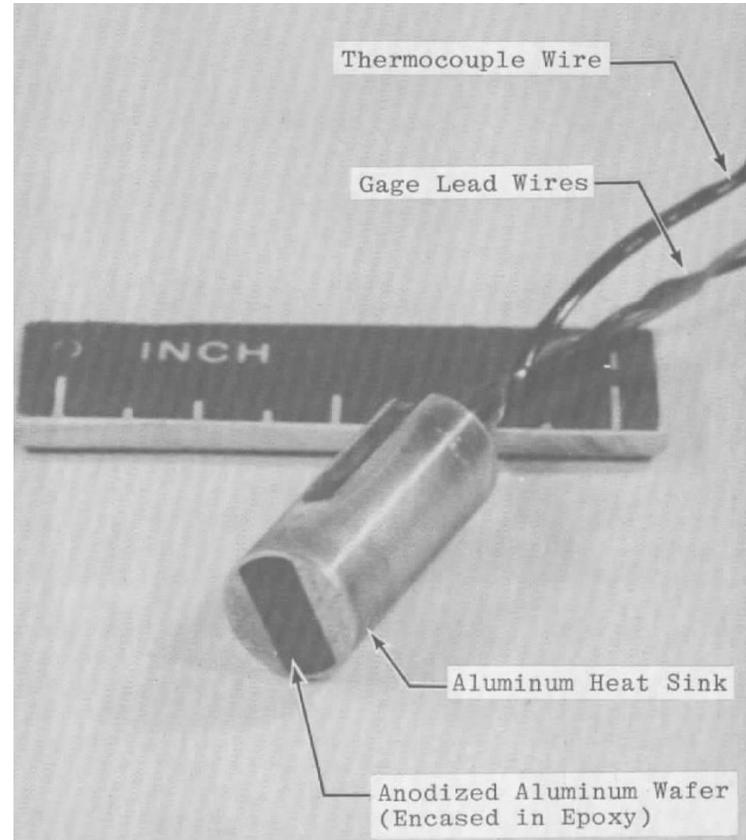
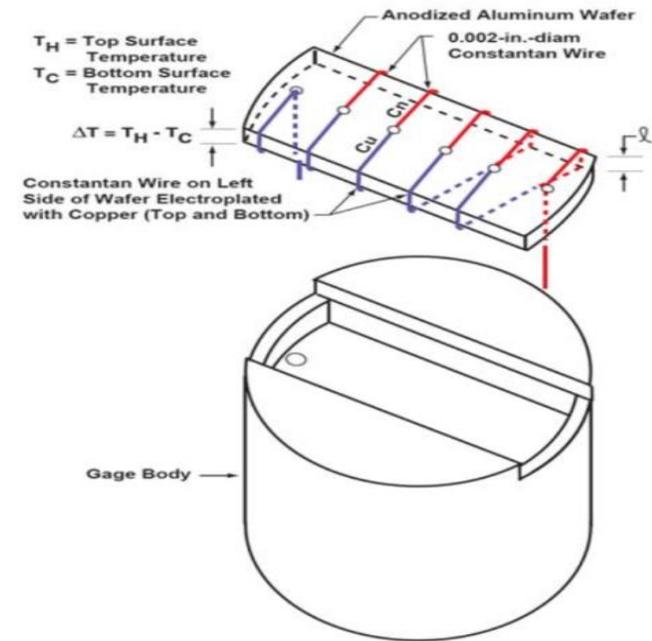


Schéma de principe :



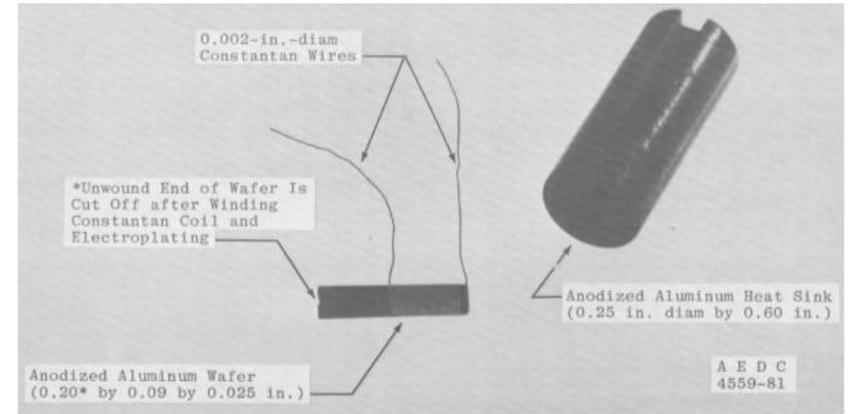
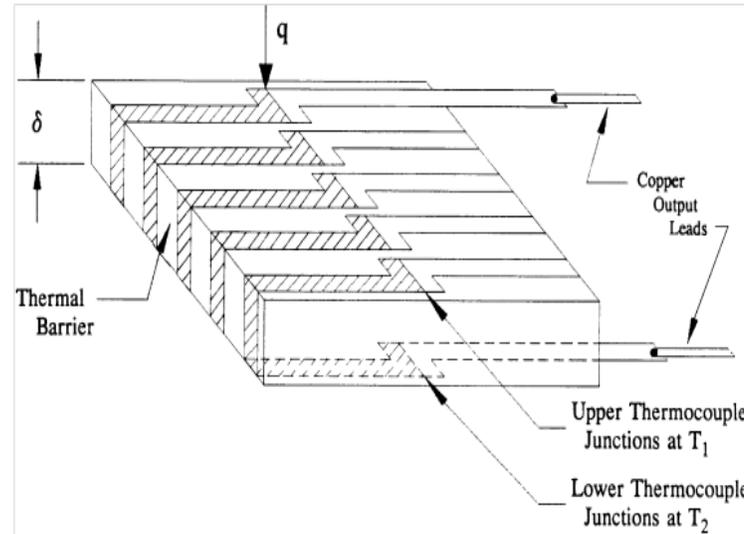
Puits de chaleur : bloc massif en aluminium anodisé (isolation électrique)

Élément sensible : Wafer (en aluminium anodisé) + fil ($5 \mu\text{m} \varnothing$) cuivre / constantan

Création d'une **thermopile** :
Association en série de thermocouples Cuivre / Constantan

LE CAPTEUR DE TYPE SCHMIDT BOELTER

Thermopile :



Mesure de la différence $T_c - T_f$

$$E = \varphi_{inc} * N * \delta * \frac{e}{\lambda}$$

N : Nombre de tour de fil

δ : pouvoir thermoélectrique
du couple cuivre/constantan ($\mu\text{V}/\text{K}$)

Association en série

=

Amélioration nette de **la sensibilité du capteur**

S_c directement proportionnelle à N

$$S_c = \frac{E}{\varphi_{inc}} = \mathbf{N} * \delta * \frac{e}{\lambda}$$

LE CAPTEUR DE TYPE SCHMIDT BOELTER

Avantages :

- Simple et robuste
- Gamme de flux assez élevée
- Signal de sortie directement proportionnel **au flux incident** et au nombre **d'enroulement N**
- Stable en température

Inconvénients :

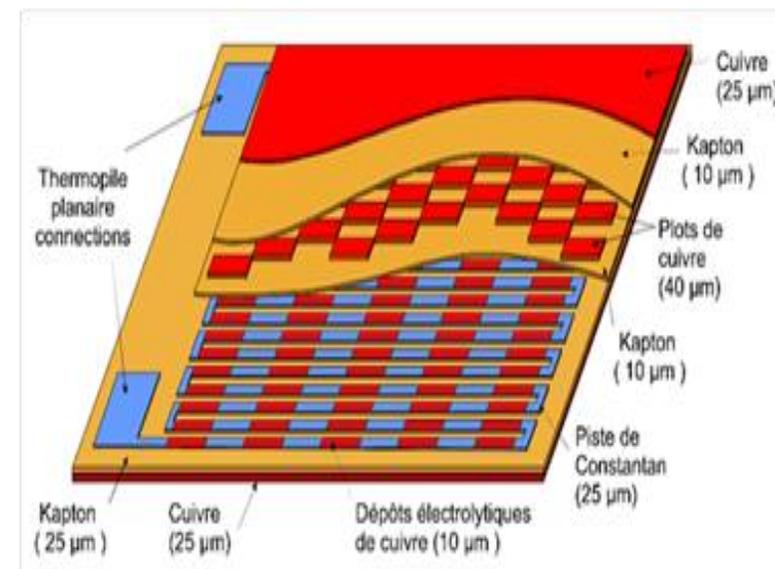
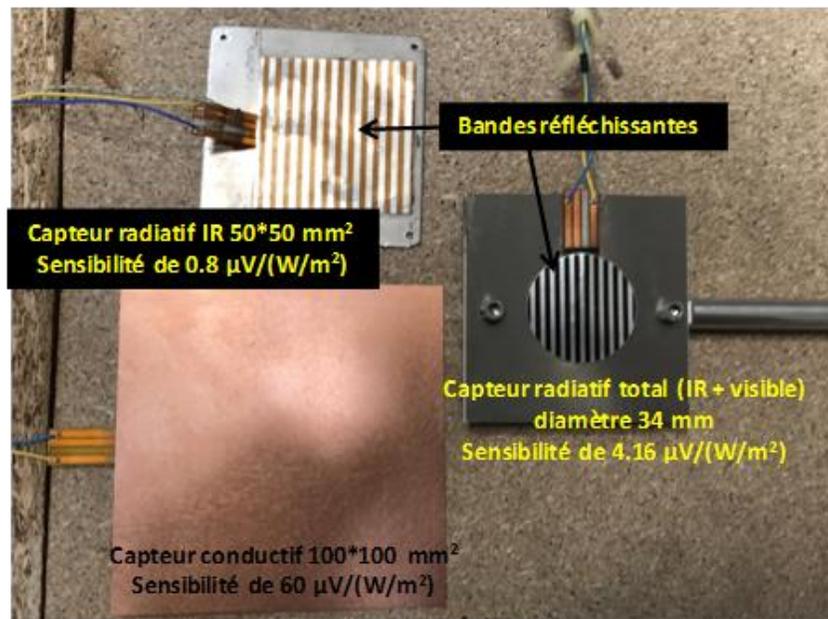
- Problème de condensation sur la surface
- Encrassement par dépôt de suies

Différences entre Gardon et Schmidt Boelter

- Même apparence mais technologie différente
- S-B **sensibilité** plus élevée et **temps de réponses** plus court

P. Théry (1981)

Schéma de principe :



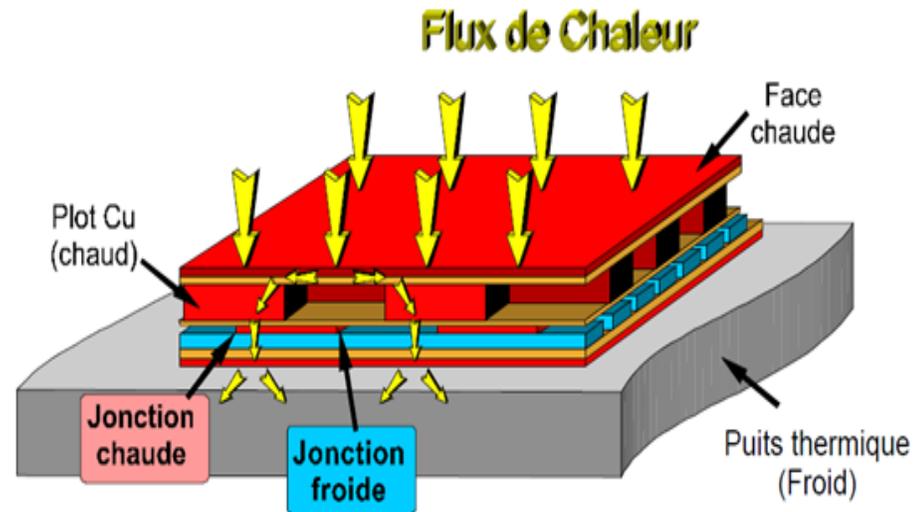
- Système multicouches :
- Couche de **cuivre** (25 μm)
 - Couche de **Kapton** (25 μm)
 - Thermopile **cuivre/constantan** (35 μm)
 - Couche de **Kapton** (10 μm)
 - Plots de **cuivre** (40 μm)
 - Couche de **Kapton** (10 μm)
 - Couche de **cuivre** (25 μm)

170 μm

LE CAPTEUR DE TYPE THÉRY

LE CAPTEUR DE TYPE THÉRY

Comment ça marche : **Création d'un gradient tangentiel**



$$E = N * \delta * R * S * \varphi_{inc}$$

N : nombre de thermocouple ($\sim 200/cm^2$)

Avantages :

- Temps de réponse rapide
- Faible épaisseur
- Bonne stabilité en température
- Signal directement proportionnel au flux incident et au nombre de thermocouple N
- Forme et dimensions variées

Inconvénients :

- Difficile à élaborer
- Température d'utilisation limitée

CRITÈRES DE CHOIX ET DE PERFORMANCE

- **Facilité d'utilisation**
- **Sensibilité au flux thermique**
- **Temps de réponse**
- **Plage de fonctionnement**
- **Réponse spectrale et directionnelle**
- **Augmentation de la température de la surface avant**
- **Température d'utilisation continue maximale**
- **Géométrie et taille physique**
- **Durée de vie**

ÉTALONNAGE

Source de référence



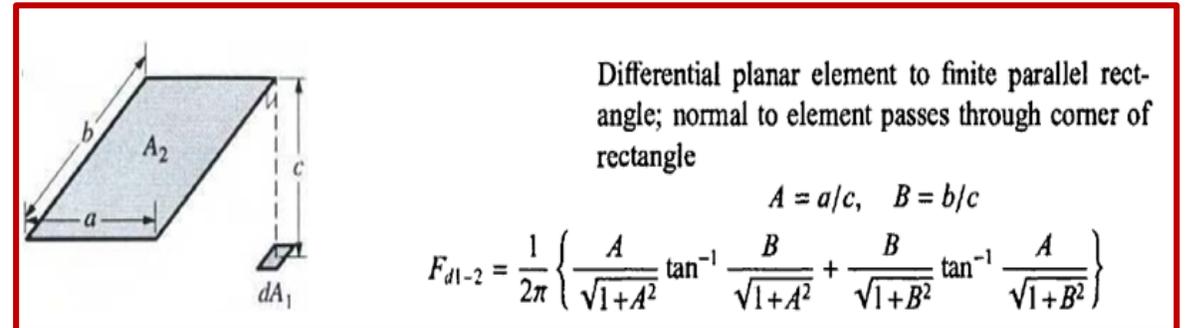
Corps noir étendu
35 cm x 30 cm de chez
HGH
(0 à 550 °C)

$$\Phi_{mesuré} = \Phi_{source} + \Phi_{amb} - \Phi_{capteur}$$

$$= F_{s-c} \sigma T_s^4 + (1 - F_{s-c}) \sigma T_{amb}^4 - \sigma T_{capteur}^4$$



Facteur de forme

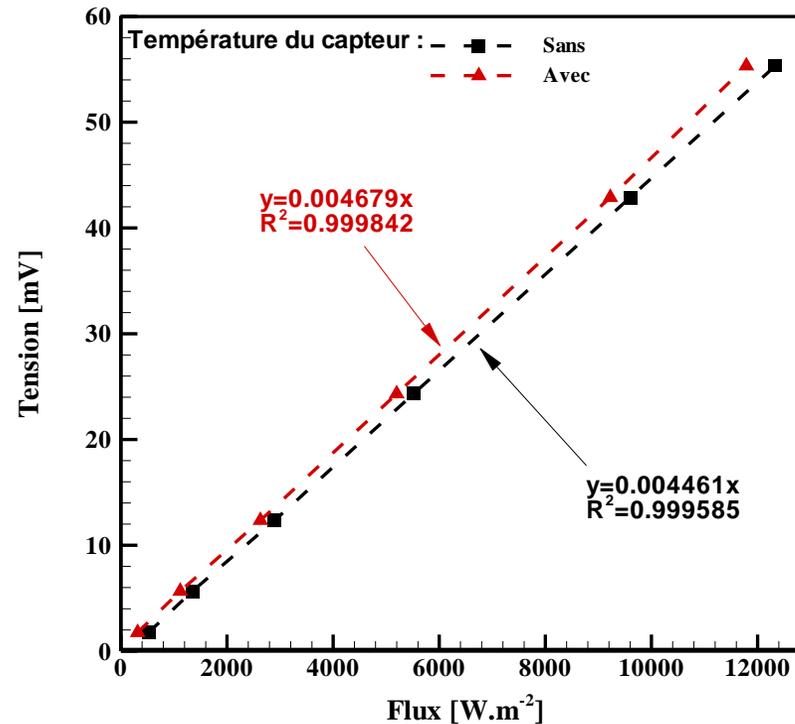


2 méthodes d'étalonnage:

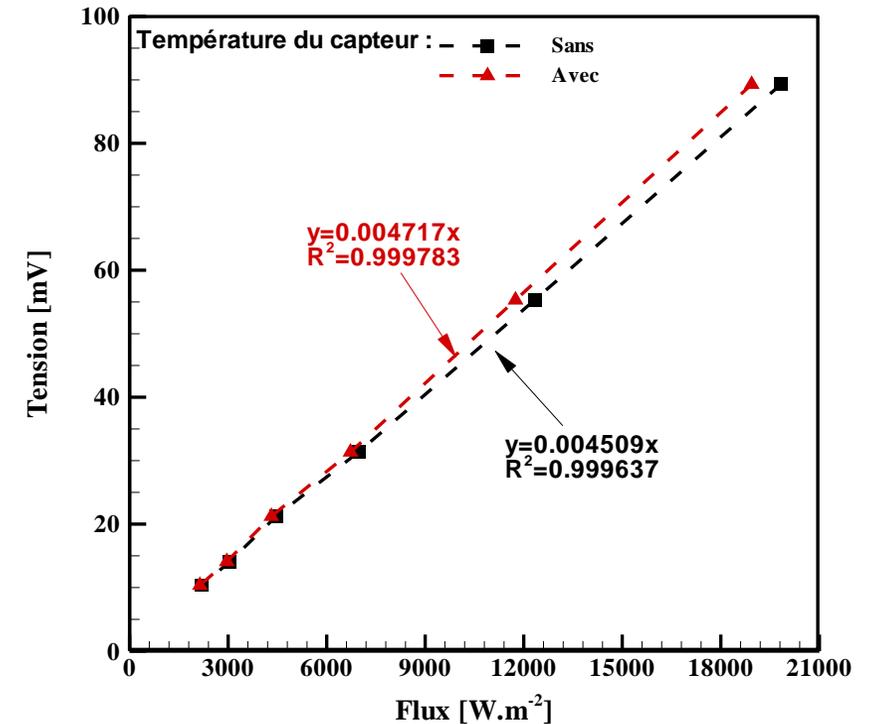
- 1) Distance fixe – Température variable
- 2) Distance variable – Température fixe

Etalonnage d'un capteur radiatif plan 50 mm*50 mm de chez CAPTEC

Distance fixe – Température variable



Distance variable – Température fixe



- ✓ Très bon accord avec les données constructeurs : $4.61 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
- ✓ Erreur relative plus faible avec prise en compte de l'émission propre du capteur

Importante pour la mesure de faibles flux

PARTIE 3

Spectrométrie et imagerie infrarouge

I. Spectrométrie

Les propriétés radiatives (ou optiques) des matériaux au cœur de l'ETR et des échanges de chaleur par rayonnement

Grandeurs totales

$$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \frac{\int T(\lambda) I_{inc}(\lambda) d\lambda}{\int I_{inc}(\lambda) d\lambda} \quad R = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \frac{\int R(\lambda) I_{inc}(\lambda) d\lambda}{\int I_{inc}(\lambda) d\lambda}$$

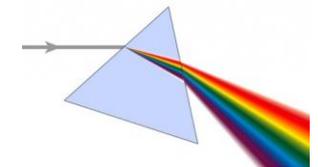
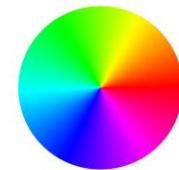
$$\varepsilon = \frac{\Phi_{emis}(T)}{\Phi_{blackbody}(T)} = \frac{\int \varepsilon(\lambda) I_{blackbody}(\lambda, T) d\lambda}{\int I_{blackbody}(\lambda, T) d\lambda}$$

Sauf pour des matériaux gris (caractéristiques indépendantes de λ), ces grandeurs dépendent du spectre illuminant le milieu (pour R, T et $A = 1 - R - T$ (absorption)) ou de la température considérée (pour l'émissivité ε)

➡ Il est préférable de faire des mesures de propriétés spectrales plutôt que totales (moyennes, intégrées)

3 possibilités pour faire des mesures spectrales :

- Utilisation de filtres passe-bandes (limité à quelques λ , ou filtre variable)
- Utilisation d'éléments dispersifs (déviations de la lumière dépendant de λ) : spectromètres à prisme (plus utilisé actuellement) ou à réseaux de diffraction
- Spectroscopie à transformée de Fourier



I. Spectrométrie

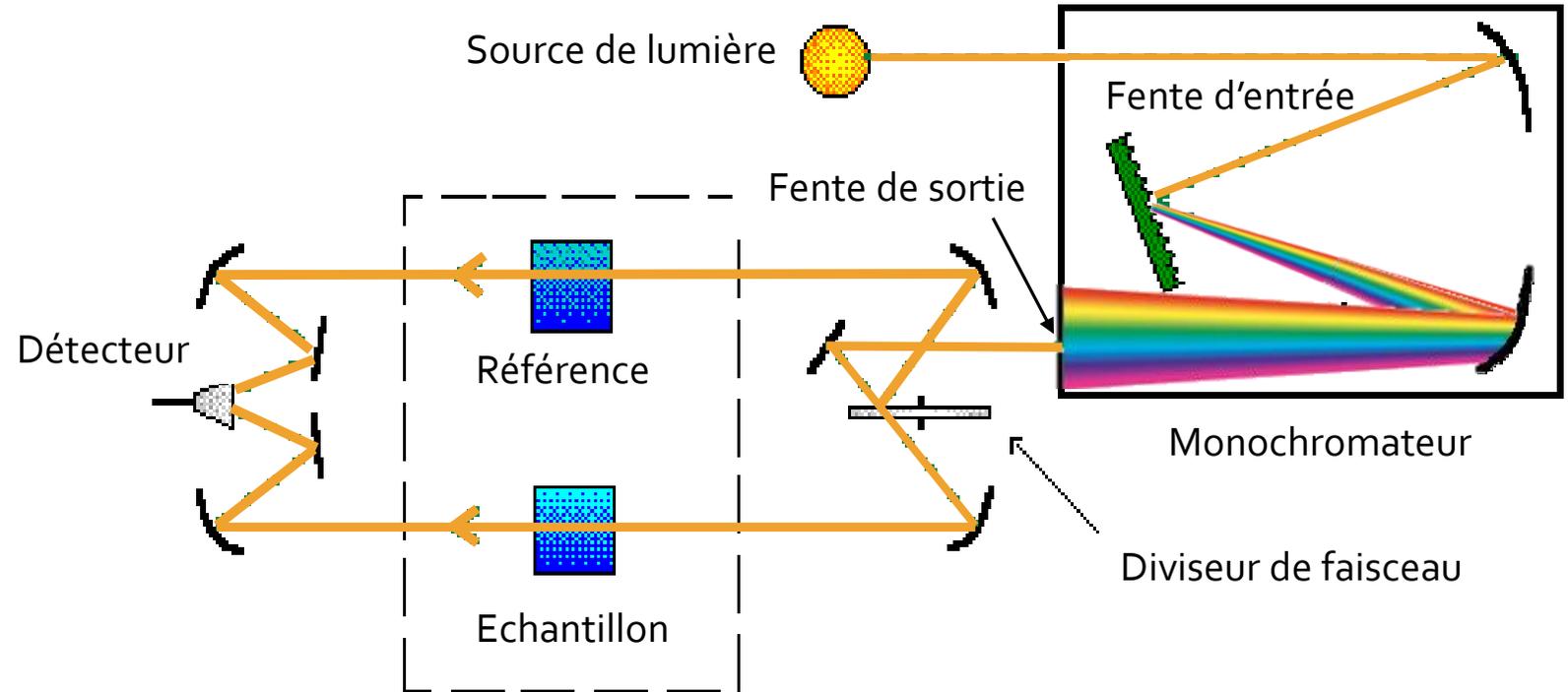
1. Les différents types de spectromètres

Spectrométrie dispersive

Spectrométrie dispersive

2 catégories : Monochromateur et spectromètre à barrette (CCD ou CMOS)

- Monochromateur



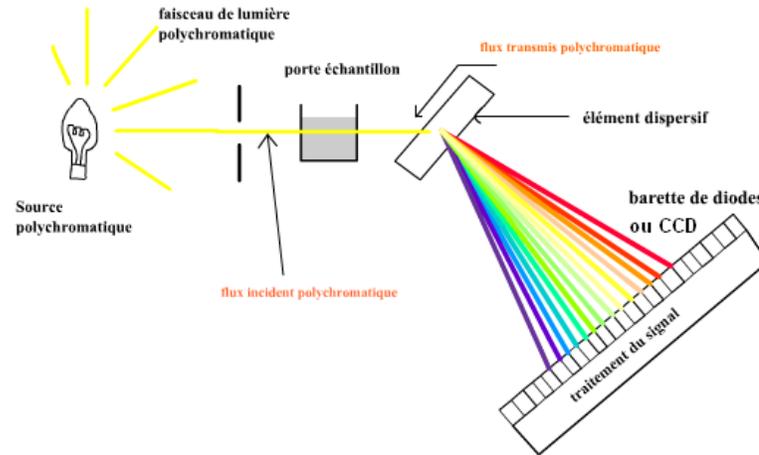
- Seule la lumière à λ choisie est utilisée (contrairement spectro TF et spectro à barette)
- Un balayage en λ est nécessaire pour obtenir un spectre (contrairement au spectro à barette)
- La résolution est d'autant plus grande que les fentes d'entrée et de sortie sont fines (impliquant diminution de la lumière disponible)

I. Spectrométrie

1. Les différents types de spectromètres

Spectrométrie dispersive

- Spectromètre à barrette



- Très compact (typ. L 10 cm x W 8 cm x H 5 cm)
- Peu cher (qq centaines à qq milliers d'euros)
- Pas de balayage nécessaire
- Résolution définie par le nombre d'éléments du capteur (typ . 512 – 2048 pixels), le réseau, et le diamètre de cœur de la fibre optique amenant la lumière
- Limité (actuellement) à UV-Vis-NIR (200 – 1100 nm) avec détecteur silicium et NIR avec détecteur InGaAs (1200 – 2600 nm)

I. Spectrométrie

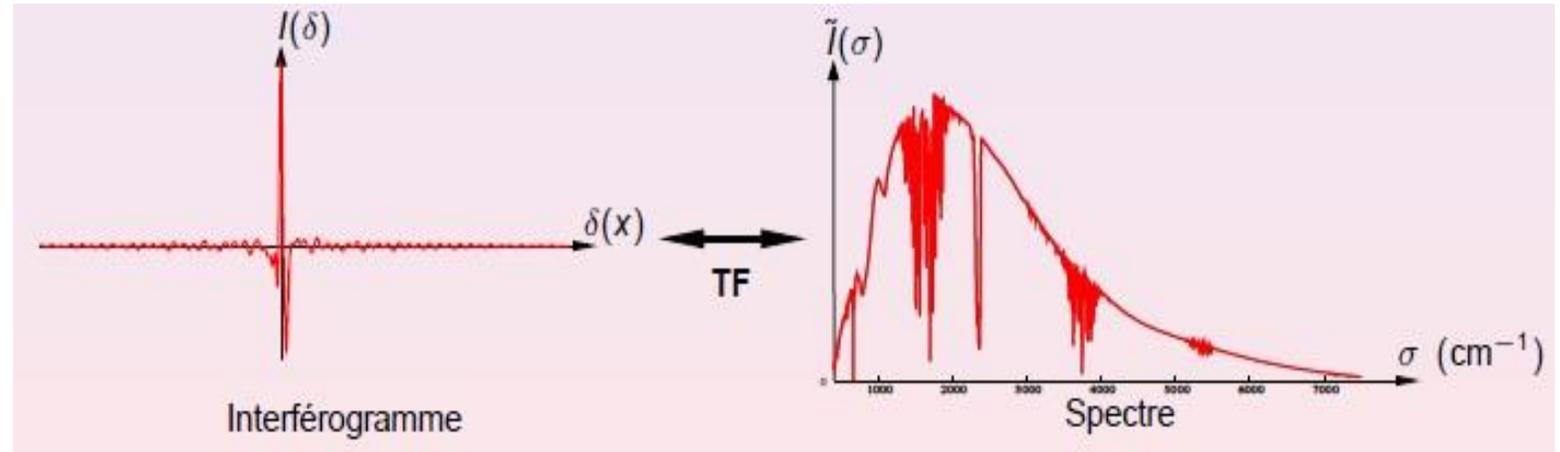
1. Les différents types de spectromètres

Spectrométrie à transformée de Fourier

Le spectromètre IRTF

Au cœur d'un spectromètre à transformée de Fourier : un interféromètre (en général type Michelson)

Spectro TF : enregistrement de $I(\delta)$ (intensité en fonction du déplacement du miroir mobile de l'interféromètre), appelé interférogramme, puis obtention du spectre par transformée de Fourier.



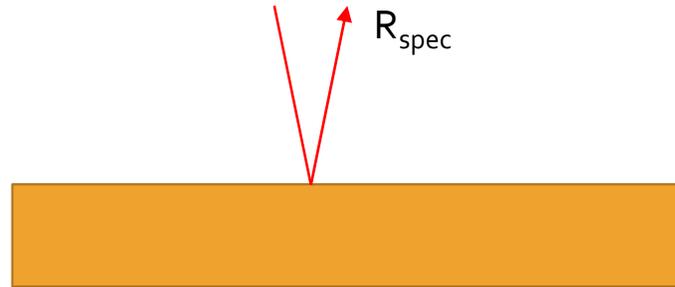
Dans l'infrarouge et pour un spectre large, le rapport Signal/Bruit est largement meilleur avec un spectro TF qu'avec un spectro dispersif à durée d'acquisition identique.

Presque 100% du marché de la spectroscopie IR (au-delà de $2.5 \mu\text{m}$) est sous forme de spectro TF

Mesures de propriétés radiatives des matériaux

Cas « simples »

Matériau opaque homogène à surface lisse et plane :
mesure de réflexion spéculaire en incidence quasi-normale R_{spec}



Absorptivité et émissivité

$$A(\lambda) = 1 - R_{\text{spec}}(\lambda) \quad (\text{conservation de l'énergie}) \\ = \varepsilon(\lambda) \quad (\text{Kirchhoff})$$



Indice optique

$$R_{\text{spec}}(\lambda) = |r_{\text{spec}}(\lambda)|^2 = \left| \frac{1 - \tilde{n}(\lambda)}{1 + \tilde{n}(\lambda)} \right|^2 \quad \text{Si milieu homogène semi-infini}$$

avec $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + i k(\lambda)$ Indice optique complexe

$n(\lambda)$ Indice de réfraction et $k(\lambda)$ Indice d'absorption

I. Spectrométrie

2. Mesure de propriétés radiatives des matériaux

Matériau opaque non diffusant

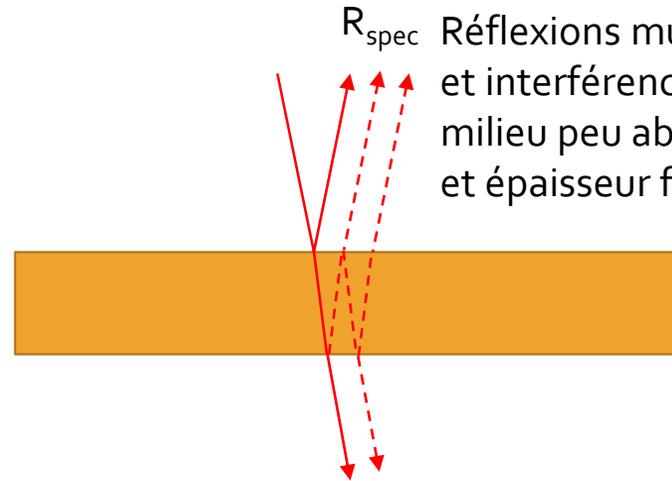
I. Spectrométrie

2. Mesure de propriétés radiatives des matériaux

Matériau semi-transparent non diffusant

Matériau semi-transparent homogène à surface lisse et plane :

mesure de réflexion et de transmission spéculaire en incidence quasi-normale R_{spec} et T_{spec}



R_{spec} Réflexions multiples et interférences si milieu peu absorbant et épaisseur faible

$$A(\lambda) = 1 - R_{\text{spec}}(\lambda) - T_{\text{spec}}(\lambda) \quad (\text{conservation de l'énergie})$$
$$= \varepsilon(\lambda) \quad (\text{Kirchhoff})$$

➔ Absorptivité et émissivité

$$T_{\text{spec}} \approx (1 - R_{\text{spec}})^2 \exp(-\kappa e)$$

(Si réflexion multiples négligées)

Si la réflexion est assez faible, la mesure de transmission pour deux épaisseurs donne une bonne estimation de l'indice d'absorption k (ou du coefficient d'absorption κ)

$$k(\lambda) \approx \frac{\lambda}{4\pi(e_2 - e_1)} \ln \left(\frac{T(e_2, \lambda)}{T(e_1, \lambda)} \right)$$

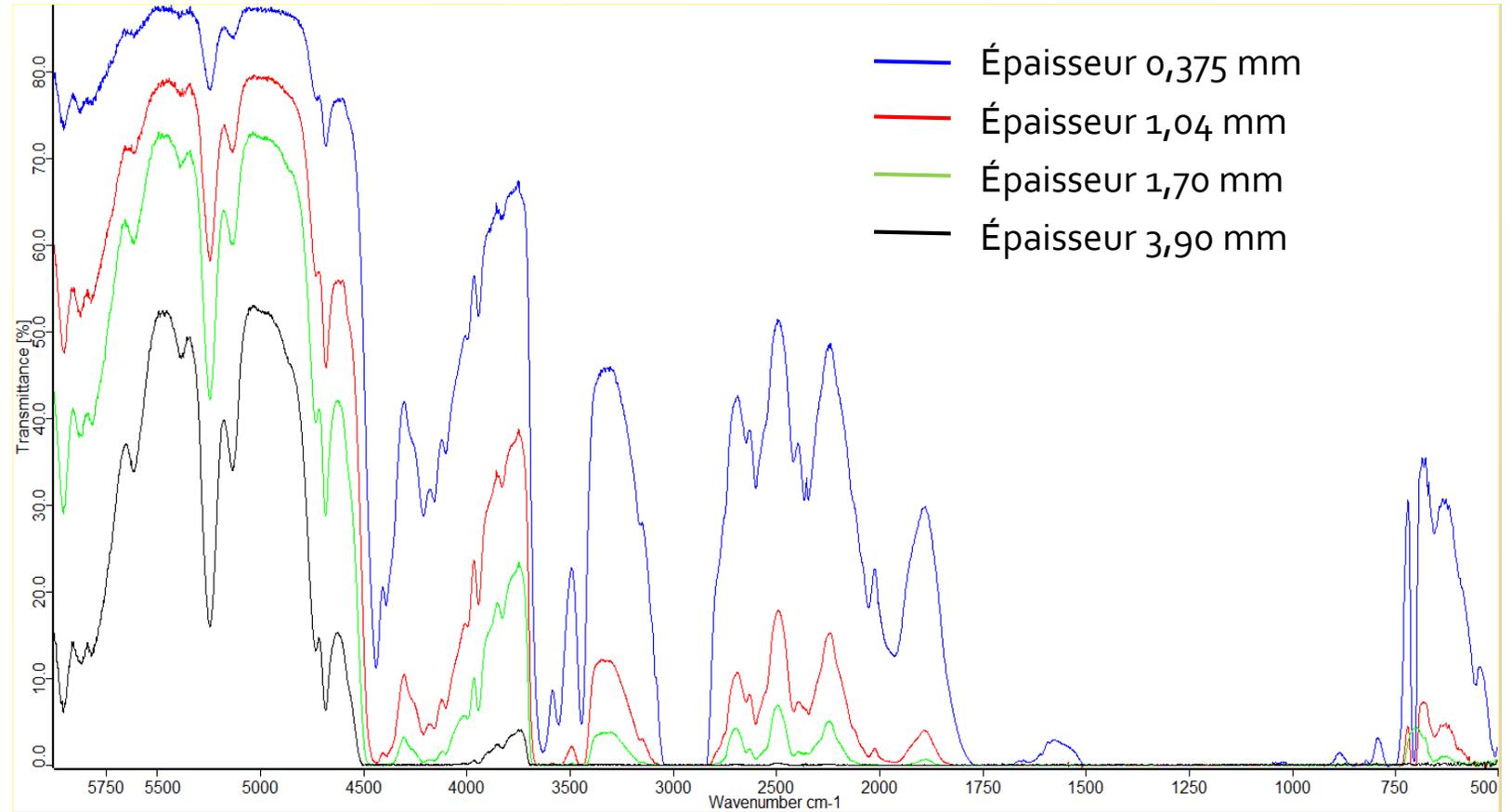
$$\kappa(\lambda) \approx \frac{1}{(e_2 - e_1)} \ln \left(\frac{T(e_2, \lambda)}{T(e_1, \lambda)} \right)$$

I. Spectrométrie

2. Mesure de propriétés radiatives des matériaux

Matériau semi-transparent non diffusant

Exemple : lame de PMMA



I. Spectrométrie

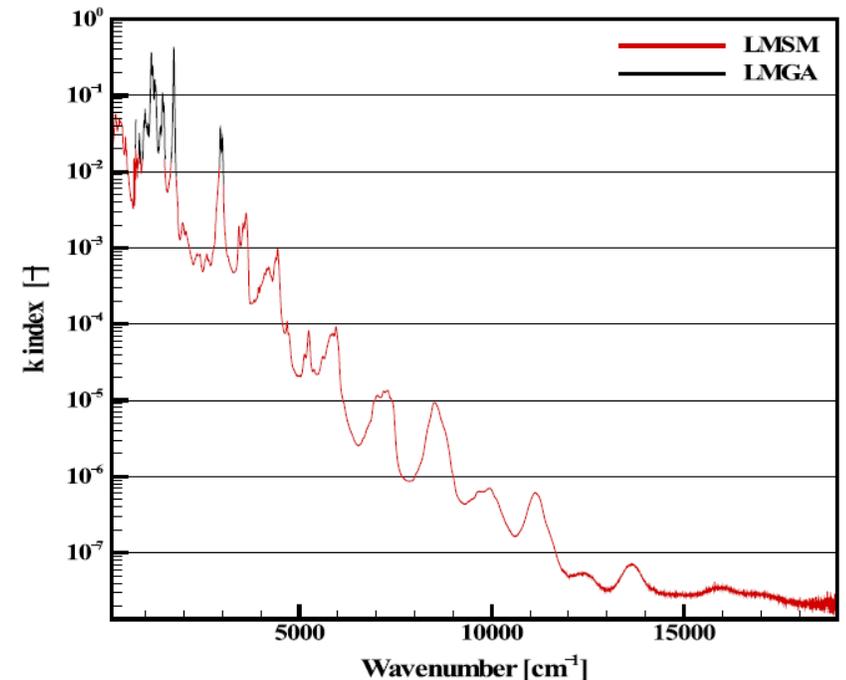
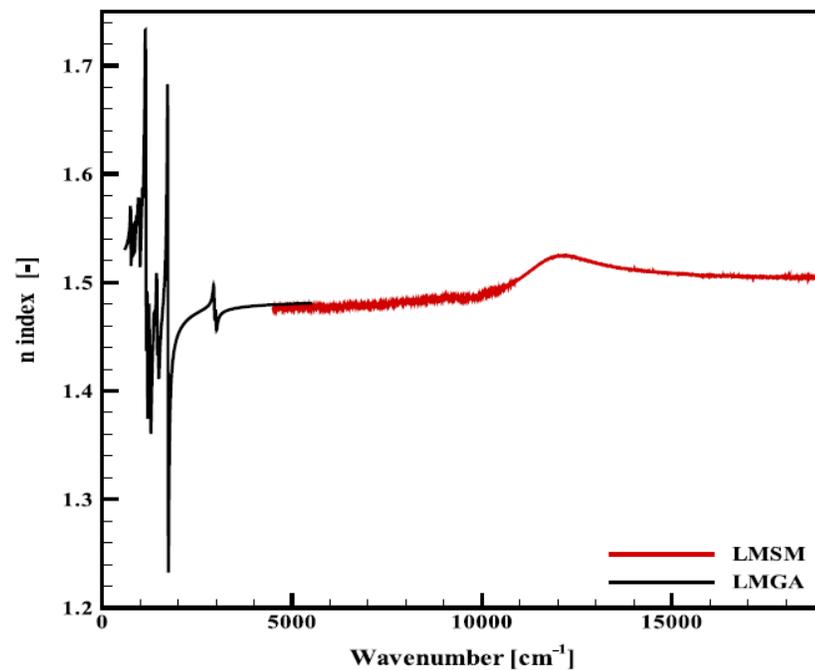
2. Mesure de propriétés radiatives des matériaux

Matériau semi-transparent non diffusant

Mesures de transmission sur des échantillons d'épaisseurs 0,3 mm à 10 cm + mesure de réflexion sur échantillon épais et ajustement de la courbe de réflexion par une somme de 17 oscillateurs de Lorentz

➔ Indice d'absorption du PMMA sur 7 ordres de grandeur !

P. Boulet et al. / International Journal of Thermal Sciences 82 (2014) 1–8



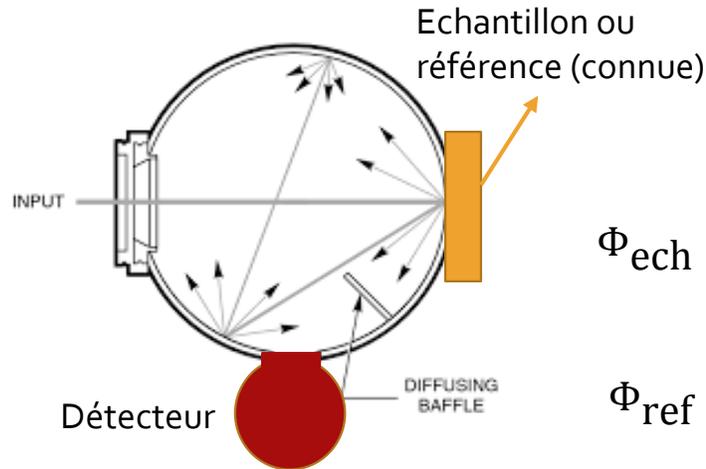
I. Spectrométrie

2. Mesure de propriétés radiatives des matériaux

Matériau diffusant

Matériau opaque diffusant (en surface ou en volume) :
mesure de réflexion directionnelle-hémisphérique

Utilisation d'une sphère intégrante



$$A(\lambda) = 1 - R_{NH}(\lambda) \quad (\text{conservation de l'énergie}) \\ = \varepsilon(\lambda) \quad (\text{Kirchhoff})$$

➔ Absorptivité et émissivité

$$\Phi_{ech} = \frac{\Phi_{inc}}{\pi A_s} \frac{\rho_{ech}}{1 - \bar{\rho}_s} A_d \Omega$$

$$\Phi_{ref} = \frac{\Phi_{inc}}{\pi A_s} \frac{\rho_{ref}}{1 - \bar{\rho}_s} A_d \Omega$$

A_s surface de la sphère
 A_d aire du détecteur
 Ω angle solide de détection
 $\bar{\rho}_s$ réflectivance moyenne de la sphère



2 types de revêtement diffusant pour les sphères intégrantes :

- Blanc (BaSO_4 ou téflon (labsphère® spectralon®) : visible et NIR (λ max 2500 nm)
- Or (labsphère® infragold®) : infrarouge

I. Spectrométrie

3. Mesure d'émission de rayonnement

Mesures d'émission

Le rayonnement provenant d'une source est analysé par un spectromètre

Contrairement à une mesure de transmission ou de réflexion qui est le rapport de deux mesures, une mesure d'émission contient la réponse spectrale du spectromètre

➡ Le spectromètre doit être calibré par une source d'étalonnage connue, en général un corps noir

$$L_{\sigma}(\sigma) = \frac{\text{Signal d'émission}(\sigma)}{\text{Signal obtenu sur corps noir}(\sigma)} L_{b\sigma}(\sigma, T)$$

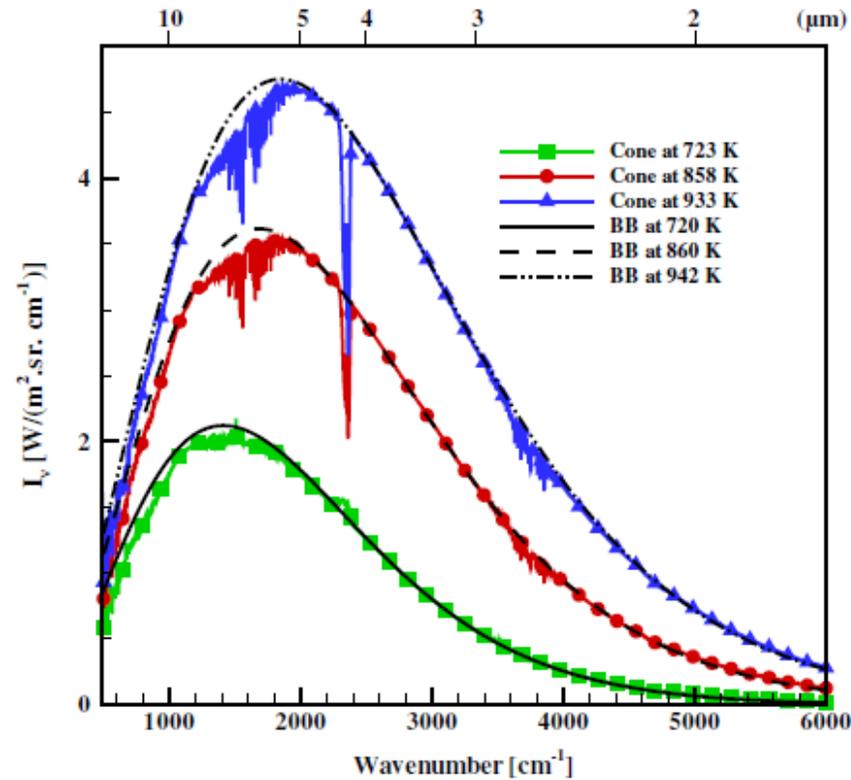
↙
Luminance du corps noir
utilisé pour la calibration

I. Spectrométrie

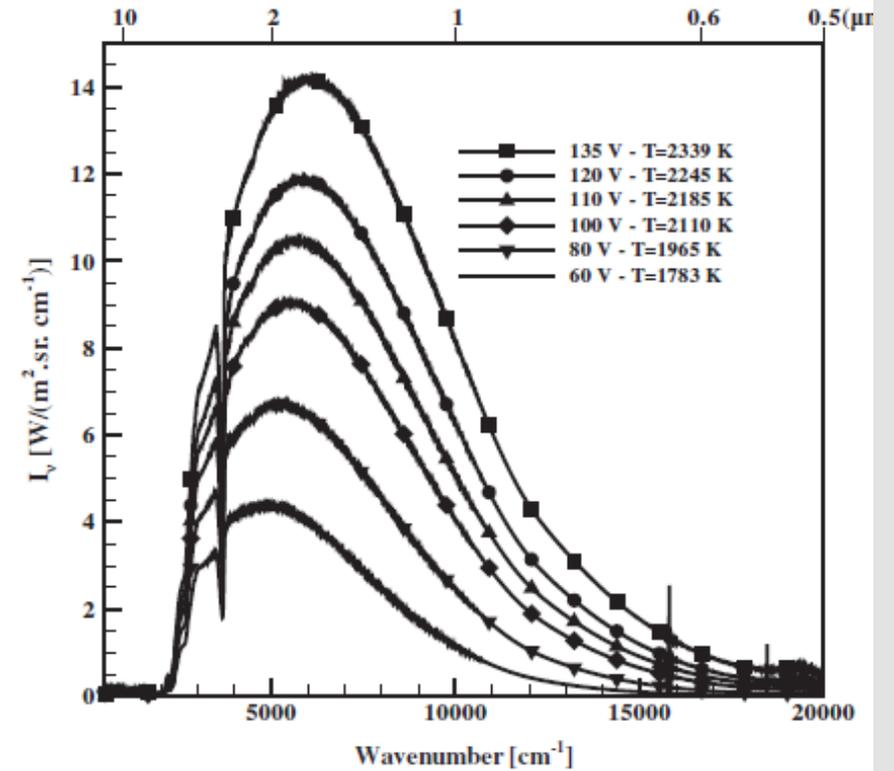
3. Mesure d'émission de rayonnement

Quelques exemples

Emission par un cône calorimètre



Emission par la lampe d'un FPA

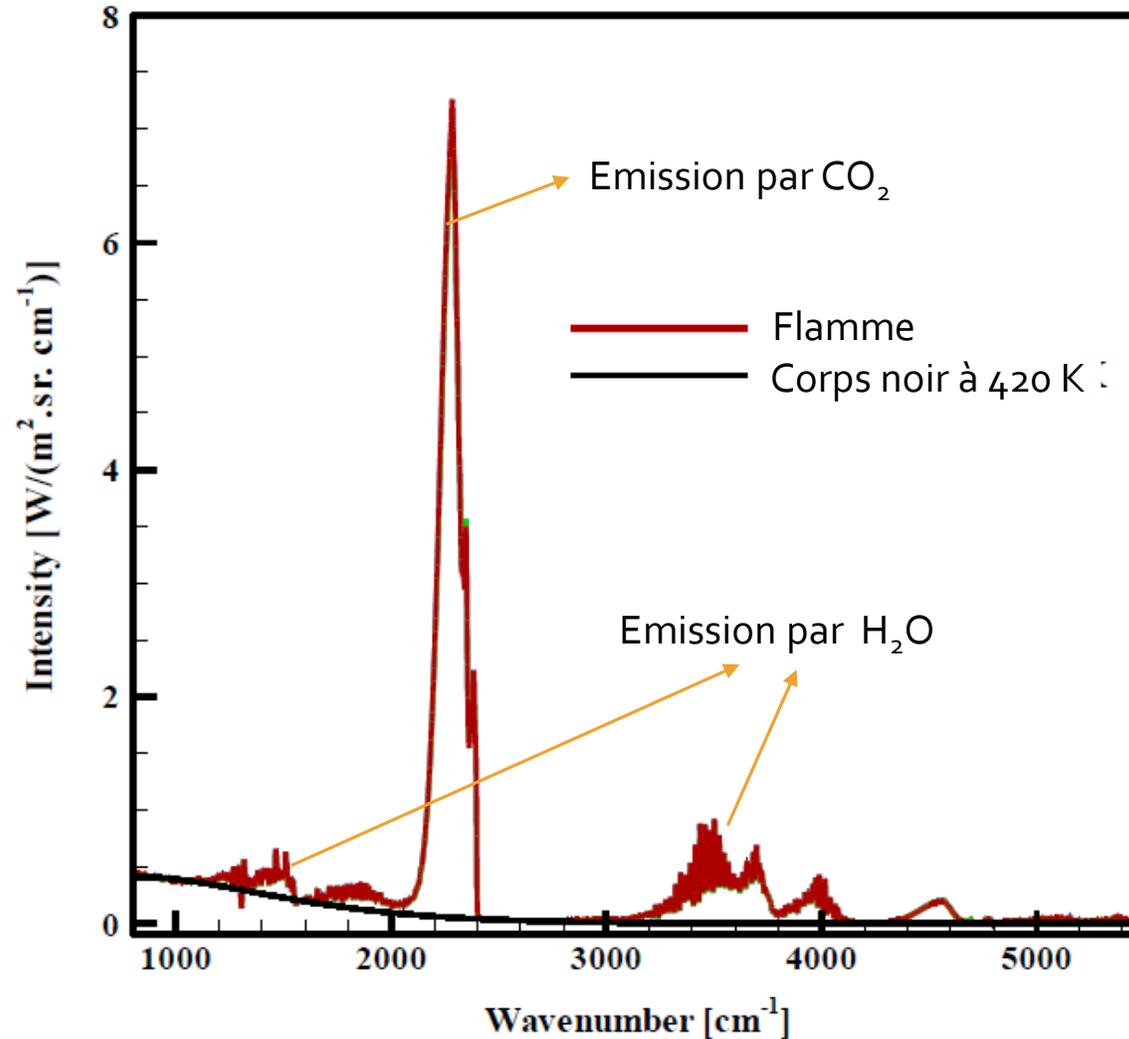


P. Boulet et al. / International Journal of Thermal Sciences 77 (2014) 223–232

I. Spectrométrie

3. Mesure d'émission de rayonnement

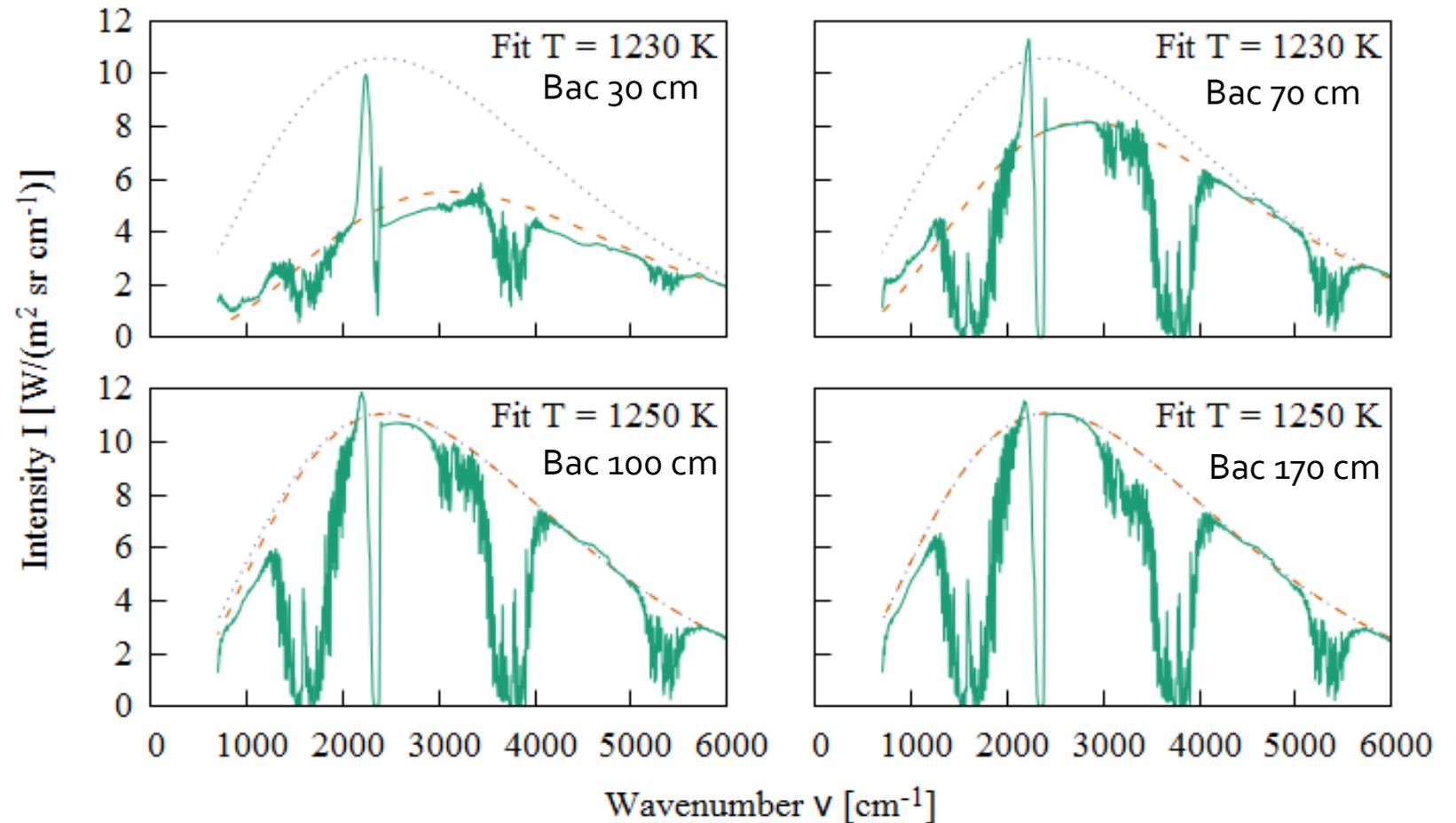
Emission par une flamme de prémélange méthane - air



I. Spectrométrie

3. Mesure d'émission de rayonnement

Emission par une flamme obtenue sur un bac de kérosène (essais LEMTA – LCPP)



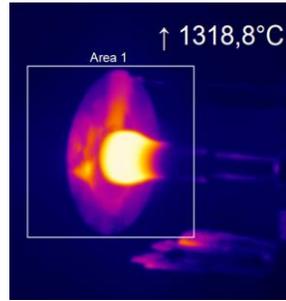
Modèle de flamme semi-transparente homogène - isotherme

$$L_{\nu}(s, \nu) = \underbrace{(1 - \exp(-\kappa(\nu)s))}_{\text{« émissivité »}} L_{0\nu}(T(s), \nu)$$

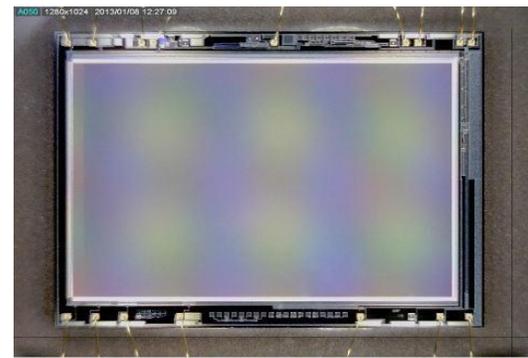
« émissivité »

II. Imagerie infrarouge

1. Les caméras infrarouges



Caméra infrarouge : objectif + capteur infrarouge matriciel (+ boîtier – électronique – logiciel)



Capteur matriciel



Objectif

II. Imagerie infrarouge

1. Les caméras infrarouges

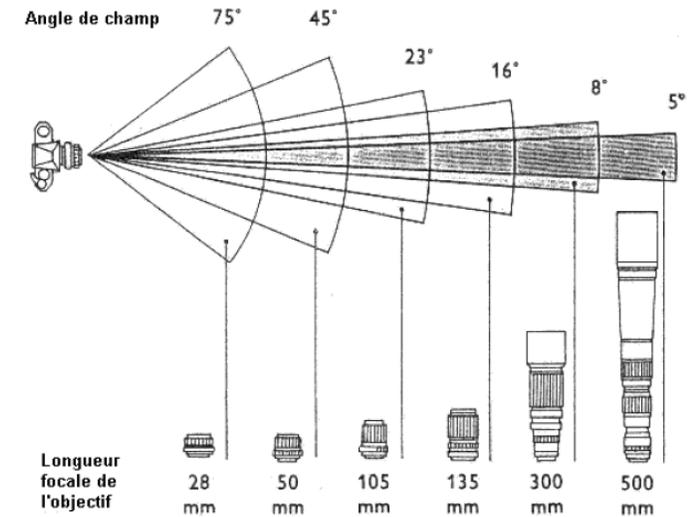
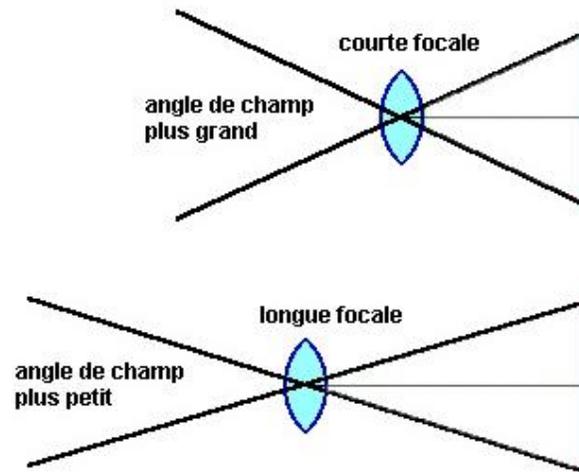
Objectifs

Objectifs : 2 catégories

- Objectif « champ lointain » : destiné à une observation à grande distance de quelques dizaines de cm à l'infini

Caractérisé par : a) son nombre d'ouverture (*f*-number) f/N : défini par le rapport entre le diamètre d'ouverture de l'objectif sur sa distance focale : plus N est petit plus l'objectif est lumineux

b) Sa distance focale f . Elle détermine le champ de vision de la caméra



Pour une mise au point à l'infini on a

$$\tan(\alpha/2) = d/(2/f) \quad \alpha \approx d/f$$

II. Imagerie infrarouge

1. Les caméras infrarouges

Capteurs

- Objectif « macro » : destiné à une observation à courte distance (plage de réglage faible autour de la distance de travail) et observer des objets avec une grande résolution

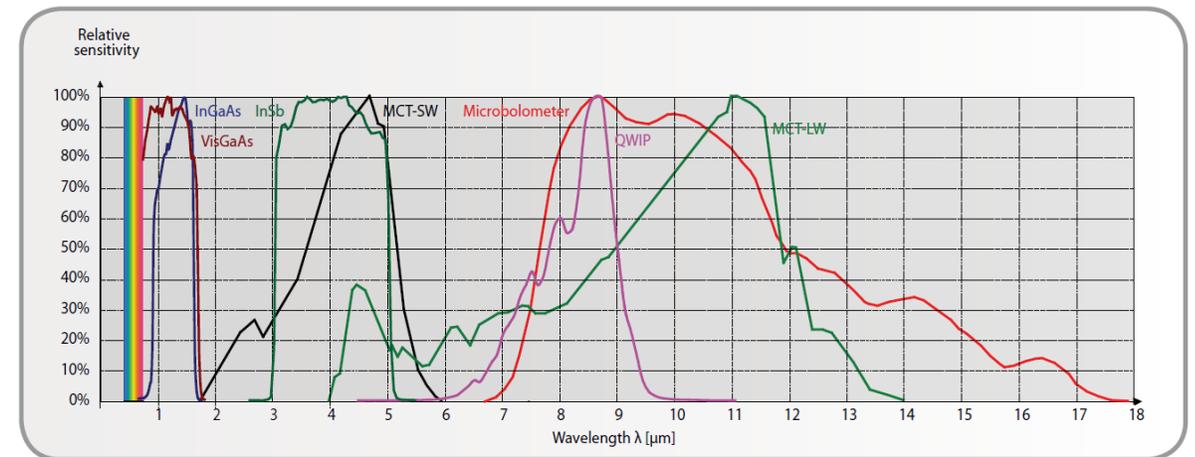
Caractérisé par son grandissement : rapport entre la taille de l'objet et la taille de l'image.

Capteurs

Principales caractéristiques

- Résolution, nombre de pixels : de 160 x 120 à 1280 x 1024 (HD)
- « pitch » : distance entre deux pixels
- NETD Noise Equivalent Temperature Difference
- Temps de réponse
- Gamme spectrale

- SWIR Short Wavelength
IR 1,4 – 3 μm
- MWIR Mid Wavelength
IR 3 – 8 μm
- LWIR Long Wavelength
IR 8 – 15 μm



2 catégories de capteur :

Thermiques (microbolomètres ou pyroélectriques) - Photoélectriques

II. Imagerie infrarouge

1. Les caméras infrarouges

Capteurs « thermiques »

a) Détecteurs thermiques non refroidis

La lumière est absorbée et convertie en chaleur.
L'augmentation de température est convertie en

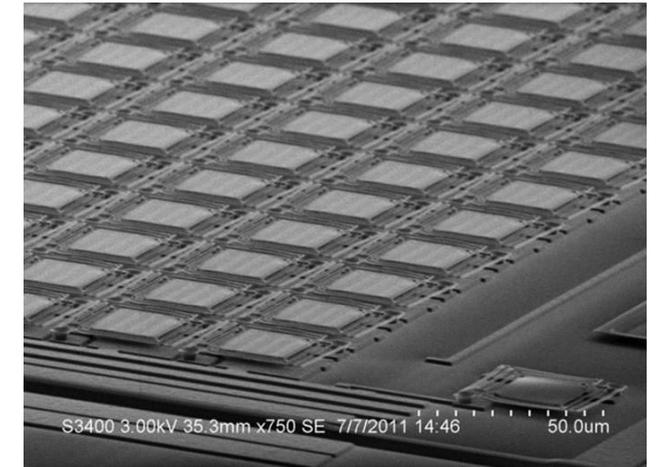
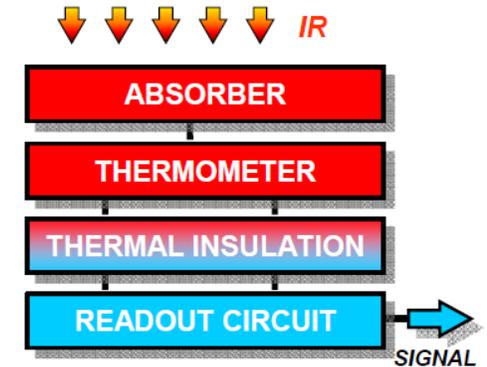
- Apparition d'une tension : effet pyroélectrique
(Ex Baryum Strontium Titanate)
- Variation de résistance : microbolomètre

Avantages :

- Peu cher
- Pas besoin d'un refroidissement à très basse température (coûteux)

Inconvénients :

- Lent
- temps de réponse fixe (inertie thermique) : quelques dizaines de ms
- NETD typ. 50 mK



La plupart des capteurs microbolomètres fonctionnent dans la gamme Spectrale 7 – 14 μm dite LWIR (Long Wave InfraRed)

II. Imagerie infrarouge

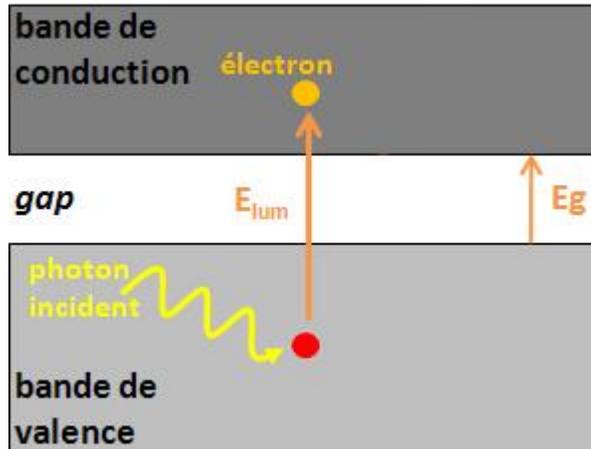
1. Les caméras infrarouges

Capteurs photoélectriques

b) Détecteurs Photoélectriques

Semiconducteurs :

Les photons sont absorbés, en contrepartie un électron change de bande d'énergie

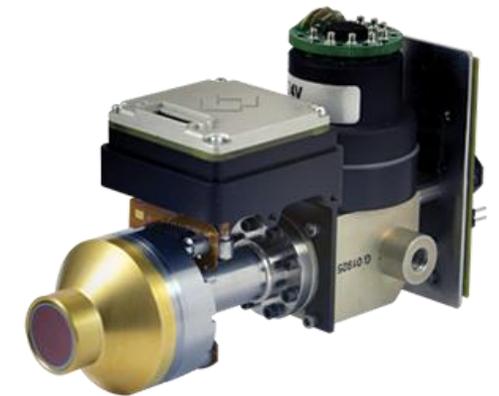


Nécessite $E = h\nu = hc/\lambda > E_{gap}$
Soit $\lambda < hc/E_{gap} = \lambda_c$
(exemple $\lambda_c < 1,1 \mu m$ pour le silicium)

Un électron peut aussi passer dans la bande de conduction par activation thermique. Energie thermique moyenne : $k_B T$

Nécessite $kT \ll E_{gap}$

Nécessite un refroidissement du capteur (typ. 77K température de l'azote liquide)



Cryo-cooler

II. Imagerie infrarouge

1. Les caméras infrarouges

Capteurs photoélectriques

Principaux semiconducteurs utilisés pour réaliser des capteurs matriciels

- InGaAs, gamme SWIR
- InSb, [3-5 μm] gamme MWIR
- HgCdTe (MCT) [8 μm – 9,5 μm] gamme LWIR

Avantages des détecteurs photoélectriques

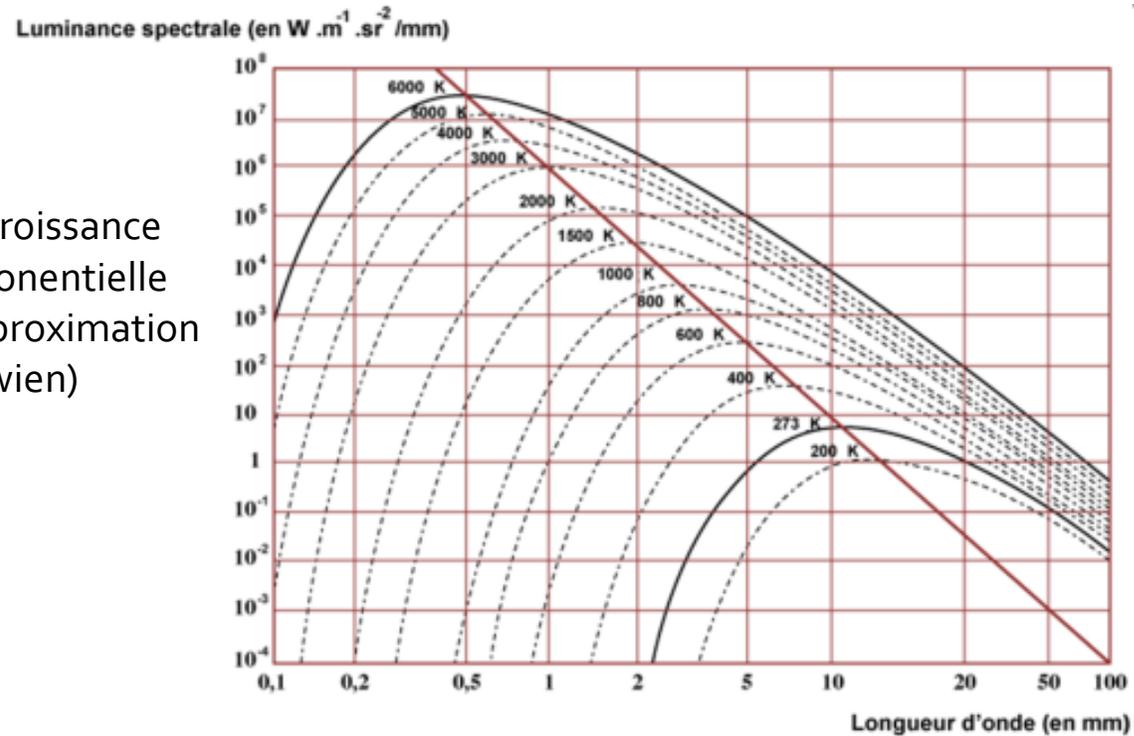
- Très rapides : frame-rate jusqu'à 1 kHz en full-frame (640 x 512 pixels) pour les meilleures caméras actuelles
- Temps d'intégration variable de moins de 1 μs à quelques dizaines de ms
- La réponse est proportionnelle au temps d'intégration
- NETD 20 à 25 mK

Inconvénients :

- Capteur intrinsèquement coûteux
- Nécessite un refroidissement à basse température lui aussi coûteux

2. Application des caméras infrarouges à la thermographie

Rayonnement du corps noir : rappel



Décroissance exponentielle (approximation de wien)

Approximation de Rayleigh - Jeans

$$L(\lambda, T) \approx \frac{2 c k_B T}{\lambda^4} \propto T$$

- Le maximum d'énergie est situé autour de $\lambda_{\text{wien}} [\mu\text{m}] \approx 2898 / T[\text{K}]$

- A température ambiante les capteurs μ bolomètres peu sensibles travaillent aux alentours de 10 μm (bande 7 – 14 μm)

- La sensibilité en température est bien supérieure aux courtes longueurs d'ondes : une faible variation de température se traduit par une forte variation de luminance. Les capteurs InSb refroidis permettent de travailler efficacement dans cette zone bien que le signal soit beaucoup plus faible.

II. Imagerie infrarouge

2. Thermographie

II. Imagerie infrarouge

2. Thermographie

Niveau numérique (Digital Level) obtenu par un pixel (objet opaque) :

$$DL \propto \int \left[\underbrace{(R(\lambda) \epsilon(\lambda) \tau(\lambda) \Phi_{\text{obj}}(\lambda))}_{\text{Emission par l'objet}} + \underbrace{(R(\lambda) (1 - \epsilon(\lambda)) \tau(\lambda) \Phi_{\text{bg}}(\lambda))}_{\text{Réfléchi par l'objet}} + \underbrace{R(\lambda) (1 - \tau(\lambda)) \Phi_{\text{atm}}(\lambda)}_{\text{Emis par l'atmosphère}} \right] d\lambda$$

$R(\lambda)$: réponse spectrale de la caméra

$\epsilon(\lambda)$: émissivité de l'objet

$\tau(\lambda)$: transmission de l'atmosphère ($\tau \approx 1$ pour une distance < 3 m en MWIR et < 8 m en LWIR)

Modèle gris

$$DL \propto \epsilon_{\text{equiv}}(T_{\text{obj}}) \tau \sigma T_{\text{obj}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{equiv}}) \tau \Phi_{\text{b}} + (1 - \tau) \Phi_{\text{atm}}$$

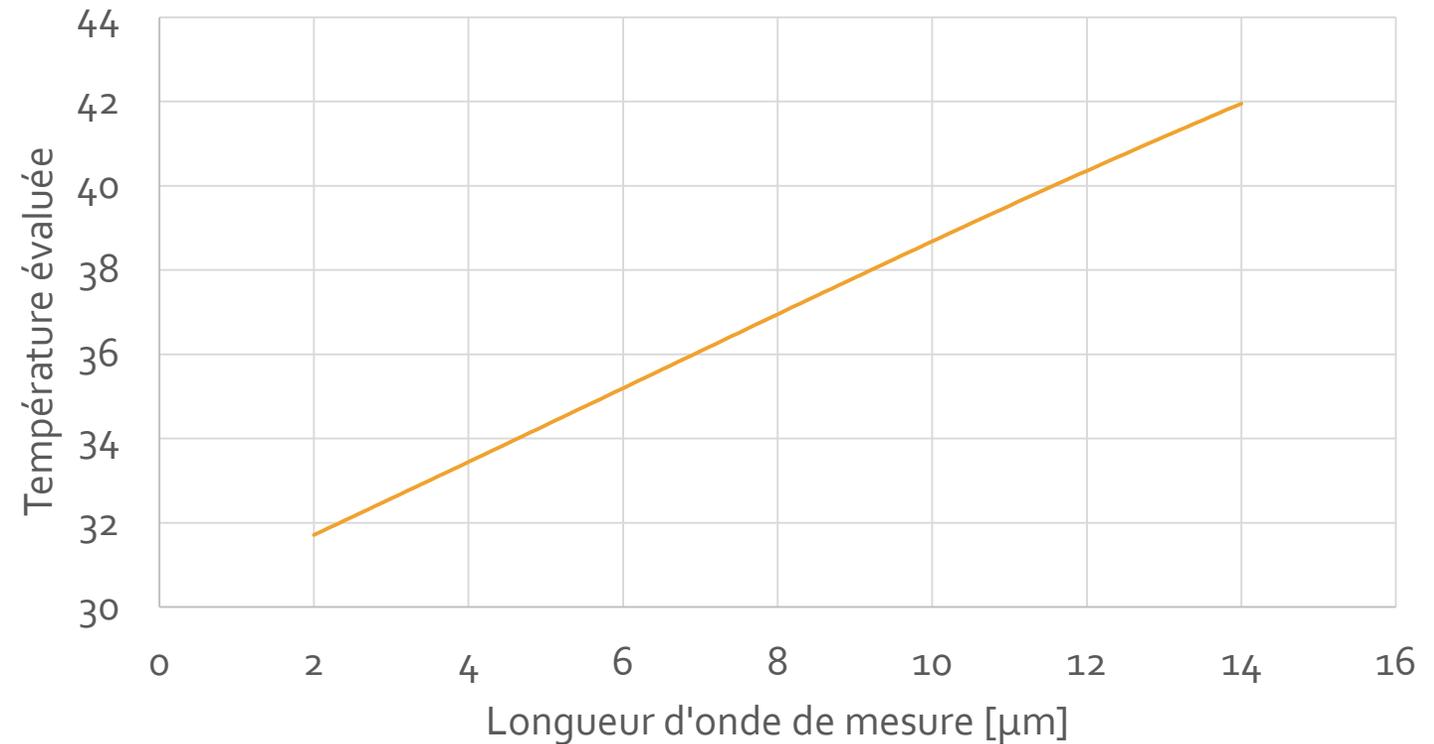
Principale inconnue : Emissivité équivalente = émissivité moyenne pondérée par la réponse spectrale de la caméra et par la luminance du corps noir à la température de l'objet

II. Imagerie infrarouge

2. Thermographie

Sensibilité à l'émissivité en fonction de la longueur d'onde de mesure

- Hypothèses :
- Mesure monochromatique à la longueur d'onde λ
 - Température réelle : 30 °C
 - Emissivité réelle : 0,8
 - Emissivité supposée : 0,7 (erreur de 10%)



II. Imagerie infrarouge

2. Radiométrie

2. Application des caméras infrarouges à la radiométrie

La réponse d'une caméra IR est affine en flux

- ➔ La calibration de la caméra avec un corps noir permet de remonter à des valeurs de luminance émise par l'objet. Souvent on privilégie des mesures quasi-monochromatiques en équipant la caméra de filtres passe-bandes

